

# **EnFo-2030**

## **Abschlussbericht**

### **Strategisches Leitprojekt**

#### **Trends und Perspektiven der Energieforschung**

Teilprojekt:

Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende

(FKZ 03ET4036 X-Z)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

München, Berlin, Stuttgart, 26.04.2018

**Autorinnen und Autoren:**

**Technische Universität München**

**Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Wagner, Dipl.-Ing. P. Wimmer, T. Zipperle, M.Sc.;

**ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V.**

**ifo Zentrum für Energie, Klima und Ressourcen**

Prof. Dr. rer. pol. K. Pittel, Dr. rer. pol. J. Pfeiffer, C. Weissbart, M.Sc., Dr. oec. publ. M. Zimmer

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**

**Institut für Verbrennungstechnik**

Prof. Dr.-Ing. M. Aigner, Dr. rer.nat. W. Meier, Dr.-Ing. C. Arndt

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**

**Institut für Verkehrsforschung**

Dr.-Ing. T. Kuhnimhof, Dr.-Ing. J. Anderson, Dipl.-Geogr. S. Trommer

**FfE**

Dr.-Ing. C. Pellingner

**Universität Münster**

**Lehrstuhl für Mikroökonomik, insb. Energie- und Ressourcenökonomik**

Prof. Dr. rer. pol. A. Löschel

**Kontakt:**

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner

Technische Universität München

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Arcisstr. 21, 80333 München

**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036 X-Z durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Executive Summary – Thesen</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Zielsetzung und Hintergrund</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Vorgehensweise</b> .....	<b>8</b>
2.1 Sektorsteckbriefe .....	8
2.2 Maßnahmensteckbriefe und Thesen .....	12
<b>3 Maßnahmensteckbriefe</b> .....	<b>15</b>
3.1 Energieanwendung: Energieeffizienz .....	15
3.2 Energieanwendung: Elektrifizierung .....	17
3.3 Energieanwendung: Brenn- und Kraftstoffsubstitution.....	18
3.4 Energiebereitstellung: Konventionelle Kraftwerkstechnik .....	19
3.5 Energiebereitstellung: Erneuerbare Energien.....	20
3.6 Energiebereitstellung: Erneuerbare Brenn- und Kraftstoffe .....	21
3.7 Querschnittsthema: Digitalisierung .....	22
3.8 Querschnittsthema: Verbraucherverhalten und Marktverbreitung von Innovationen.....	24
3.9 Querschnittsthema: Regulatorische Herausforderungen.....	26
3.10 Querschnittsthema: Flexibilitätsoptionen und Sektorkopplung .....	27
3.11 Querschnittsthema: Energiesystemanalyse.....	28
<b>4 Förderformate</b> .....	<b>30</b>
4.1 Integrative Energieforschung.....	31
4.2 Start-Up-Förderung .....	33
4.3 (Groß-)Verbundprojekte .....	35
4.4 Reallabore - neue Konzepte für die Energieforschung .....	37
<b>5 Zusammenfassung</b> .....	<b>39</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>40</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>43</b>
A.1. Sektorsteckbrief Energiewandlung .....	43
A.2. Sektorsteckbrief Industrie .....	86
A.3. Sektorsteckbrief Haushalte.....	131
A.4. Sektorsteckbrief GHD.....	179

---

A.5. Sektorsteckbrief Verkehr .....	209
A.6. Sektorübergreifende Themen in der Energieforschung .....	244

## Executive Summary – Thesen

Ziel dieses Vorhabens ist die Erarbeitung wesentlicher Eckpunkte für das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Diese werden im Folgenden thesenartig zusammengefasst. Bei der Herleitung und Formulierung der Thesen stand das Projektteam aus DLR, ifo Institut, FfE e.V. und Universität Münster unter Leitung der Technischen Universität München in intensivem Austausch mit einem Beirat aus 14 Vertretern aus Industrie, Energiewirtschaft und Wissenschaft. Zusätzlich erfolgte eine Abstimmung mit dem parallel laufenden BMWi-Leitprojekt „Technologien für die Energiewende“ (TF\_Energiewende).

Die Thesen stellen eine Synthese der Inhalte aus den im Rahmen des Projektes erarbeiteten sektorspezifischen Steckbriefen für Umwandlungssektor [1], Industrie [2], Haushalte [3], Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (GHD) [4] und Verkehr [5] sowie einem sektorübergreifenden Steckbrief [6] zu verschiedenen Querschnittsthemen dar. Letzterer umfasst Fragestellungen rund um Geschäftsmodelle, Digitalisierung, Akzeptanz, Nachfrageverhalten und regulatorischen Rahmen sowie Herausforderungen bei Betrachtung des Energiesystems und der Energiesystemanalyse. Der aus den Sektorsteckbriefen abgeleitete Forschungsbedarf wurde in den Maßnahmensteckbriefen nach Energienachfrage und -bereitstellung sowie Querschnittsthemen kategorisiert. Die aus den Maßnahmensteckbriefen abgeleiteten Thesen bilden das zentrale Ergebnis dieses Forschungsprojekts. Die Thesen beschreiben in kurzen Worten den Status Quo, den Handlungsbedarf aus Sicht der Energiewende sowie Handlungsoptionen mit Blick auf die Energieforschung. Zusätzlich fließen die Erkenntnisse einer Online-Umfrage [7] und der Beiratssitzungen in die Thesen mit ein.

Der Fokus der Thesen liegt auf der technologieoffenen Energieforschung für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende in Deutschland als Teil des europäischen Energieverbundes. Daher besteht weiterhin Forschungsbedarf für fossile Kraftwerke, obwohl nicht von einem weiteren Ausbau der Kohlekraft in Deutschland ausgegangen wird.

Außerdem wird angenommen, dass die politischen Energie- und Klimaziele für 2030 bzw. 2050 auch in Zukunft unverändert bestehen bleiben, wie ebenfalls im Koalitionsvertrag 2018 bekräftigt wird. Der von der neuen Bundesregierung angestrebte stärkere Ausbau der Erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2030 (65 % statt 50 % Anteil an der Stromerzeugung) wird dabei jedoch nicht mehr berücksichtigt.

Neben dem energiewirtschaftlichen Zieldreieck mit seinen Eckpfeilern Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit wird Nachhaltigkeit als inhärente Basis jeder These vorausgesetzt.

Die wesentlichen Herausforderungen und Eckpunkte für die zukünftige Energieforschung bzw. Forschungsförderung werden im Projekt EnFo-2030 mittels eines Top-Down-Ansatzes identifiziert und beschrieben. Der Schwerpunkt liegt folglich auf energiesystemischen Fragestellungen. Eine detaillierte Betrachtung einzelner Technologien wie beispielsweise von verschiedenen Speichertechnologien entspricht hingegen nicht diesem Fokus auf das „Big Picture“ der Energiewende, sondern ist Gegenstand des parallelen strategischen Leitprojektes TF\_Energiewende.

Die 12 Thesen adressieren einerseits je drei Schwerpunkte der Energiebereitstellung und Energieanwendung bei der Dekarbonisierung des Energiesystems. Andererseits werden fünf zentrale Querschnittsthemen aufgegriffen sowie Empfehlungen zur Fortentwicklung der Förderformate zusammengefasst.

### 1. **Energieanwendung: Energieeffizienz**

Eine weitere Steigerung der Energieeffizienz für alle Anwendungen erneuerbarer und konventioneller Energien ist unverändert von sehr hoher Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele. Dabei spielen im Gebäudebereich besonders Maßnahmen zur Reduktion des Raumwärmeverbrauchs (Energetische Modernisierung, Wärme-/Kältebereitstellung), im Verkehr bei mechanischer Energie (u.a. Elektromobilität), in der Industrie bei Prozesswärme (Querschnitts- und Prozesstechnologien) eine Rolle. Neben den technologischen Herausforderungen sollen zukünftig Effizienzpotentiale kritisch evaluiert und auch nicht-technische Umsetzungshemmnisse verstärkt erforscht werden.

### 2. **Energieanwendung: Elektrifizierung**

Die Elektrifizierung unterstützt die Integration der Erneuerbaren Energien und wird mit deren Ausbau in Kombination mit Flexibilitätsoptionen weiter an Bedeutung gewinnen. Energieeffiziente Wärmeerzeugung in Form von Power-to-Heat Anwendungen, wie Wärmepumpen oder industriellen Elektrowärmeverfahren, und Elektrifizierung des Verkehrs in Kombination mit einer leistungsfähigen elektrischen Ladeinfrastruktur substituieren fossile Energieträger. Mehr noch als früher stellen damit bei der Elektrifizierung einerseits die Weiterentwicklung einzelner Technologien (z.B. Batterien für Elektrofahrzeuge) und andererseits die Systemintegration inklusive Sicherstellung der Versorgungssicherheit Herausforderungen für die Energieforschung dar.

### 3. **Energieanwendung: Brenn- und Kraftstoffsubstitution**

Die Substitution fossiler durch alternative Brenn- und Kraftstoffe in allen Anwendungssektoren stellt eine wichtige Möglichkeit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen dar. Dabei spielen alternative Kraftstoffe aus regenerativen Energieträgern eine wesentliche Rolle. Zudem besteht Forschungsbedarf bei der Konzeption einer effizienten, bedarfsorientierten und flächendeckenden Infrastruktur für alternative Kraftstoffe

im Verkehrsbereich und der sich hieraus ergebenden Pfadabhängigkeiten (z.B. Ausbau von Strom- und Wasserstoffinfrastruktur). In industriellen Prozessen steht z.B. die energetische und stoffliche Nutzung alternativer Brennstoffe für Prozesswärmeanwendungen oder innovative KWK-Techniken im Fokus.

#### 4. **Energiebereitstellung: Konventionelle Kraftwerkstechnik**

Das Stromsystem der Zukunft muss hochflexibel sein, um schnell auf geänderte Residuallastzustände durch fluktuierende Anteile Erneuerbarer Energien reagieren zu können und somit den gewohnten Standard an Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Dafür müssen emissionsarme thermische Kraftwerke bereitgehalten werden. Forschungsbedarf besteht in der Anpassung und Optimierung der Kraftwerke im Hinblick auf schnelle Lastzyklen, hohe Teillastwirkungsgrade, geringen Leerlaufbedarf, niedrige Mindestleistung und flexiblen Brennstoffeinsatz. Schwerpunkte zukünftiger Forschung sind neue Materialien, optimierte Komponenten und Betriebsweisen sowie das Zusammenspiel verschiedener zentraler und dezentraler Kraftwerkstypen mit Speichern und Netzen in einem komplexen Energiesystem.

#### 5. **Energiebereitstellung: Strom- und Wärmeerzeugung aus Erneuerbaren Energien**

Im gesamten Energiesektor, insbesondere jedoch für Wind- und Solaranlagen, besteht weiterhin Forschungsbedarf für die Steigerung des Systemwirkungsgrads, Erhöhung der Lebensdauer kritischer Komponenten und Kostenreduktion durch neue Materialien und Herstellungsverfahren. Ebenso sollte die Energieforschung auf technische Maßnahmen zur Reduktion von Hemmnissen bei der Errichtung von Erneuerbaren Energie-Anlagen abzielen, wie z.B. die Reduktion von Flächenverbrauch sowie Schall- und Geruchsemissionen.

#### 6. **Energiebereitstellung: Erneuerbare Brenn- und Kraftstoffe**

Biogene Brenn- und Kraftstoffe werden zur Substitution fossiler Brennstoffe beitragen. Ein zentrales Element für die Versorgungssicherheit werden neben elektrischen und thermischen Speichern synthetische speicherbare Brennstoffe aus Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Technologien sein. Hier besteht zusätzlicher Forschungsbedarf. Neben gasförmigen (z.B. Wasserstoff) spielen flüssige chemische Energieträger eine wichtige Rolle, weil mit ihnen hohe Energiedichten und lange Speicherdauern erzielt werden können. Um Power-to-X-Technologien in technischem Maßstab anzuwenden, müssen optimale Herstellungsverfahren und Prozessrouten (inkl. Erschließung geeigneter CO<sub>2</sub>-Quellen) ermittelt und Wirkungsgrade verbessert werden, sowie ein Upscaling der Anlagen und deren Integration in das Energiesystem erreicht werden. Ebenso sind Verfahren zur Bewertung der Brennstoffe hinsichtlich ihrer technischen, ökologischen und ökonomischen Nutzung zu entwickeln.

## 7. **Querschnittsthema: Digitalisierung**

Die Digitalisierung durchdringt alle Lebens- und Wirtschaftsbereiche und verändert die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen grundlegend. Die Energieforschung muss diese veränderten Wechselwirkungen zwischen dem Energiesystem und den weiteren Wirtschaftsbereichen aufgreifen und so ein möglichst ganzheitliches Verständnis der Implikationen der Digitalisierung für die Energiewende fördern. Die vielfältigen Chancen der Digitalisierung zur Effizienzsteigerung und Flexibilisierung im Energiesystem müssen ebenso betrachtet werden wie Änderungen in Akteursstruktur und -verhalten und neue Herausforderungen mit Blick auf Ressourceneffizienz, Datenschutz sowie Cybersicherheit und Resilienz der zusätzlich informationstechnisch vernetzten Versorgungsinfrastruktur.

## 8. **Querschnittsthema: Verbraucherverhalten und Marktverbreitung von Innovationen**

Das Gelingen der Energiewende hängt maßgeblich von der Marktverbreitung innovativer Energietechnologien und -dienstleistungen ab, aber auch von der Veränderung bestehender Energieverbrauchsgewohnheiten. Vor diesem Hintergrund sollte die Energieforschung nicht nur technische Herausforderungen und privatwirtschaftliche Kosten einzelner Technologien in den Blick nehmen. Vielmehr sollten künftig auch sozioökonomische Treiber der Marktverbreitung von Innovationen sowie das Zusammenspiel von Innovationen und Energieverbrauchsverhalten unter Berücksichtigung verhaltensökonomischer und psychologischer Besonderheiten analysiert und stärker in der Technologieentwicklung berücksichtigt werden.

## 9. **Querschnittsthema: Regulatorische Herausforderungen**

Im liberalisierten Energiemarkt kommt Preissignalen zur Koordination der unterschiedlichen Marktteilnehmer und Schaffung von Investitionsanreizen zentrale Bedeutung zu. Es ist zu klären,

- a. inwieweit die regulatorischen Rahmenbedingungen im Energiemarkt weiterentwickelt werden müssen, um die Voraussetzungen für eine effiziente marktliche Steuerung durch Preissignale zu schaffen und
- b. inwieweit Preissignale allein langfristig die Dekarbonisierung des Energiesystems in effizienter Weise und unter Wahrung der Versorgungssicherheit ermöglichen können.

Zu beachten sind dabei insbesondere auch Verteilungswirkungen und die Integration und Verflechtung des deutschen Energiemarkts mit dem europäischen Ausland.

## 10. Querschnittsthema: Flexibilitätsoptionen und Sektorkopplung

Flexibilitätsoptionen sind heute deutlich umfassender zu denken als noch zum Zeitpunkt der Erstellung des 6. Energieforschungsprogramms. Sie stellen einen essentiellen technischen Baustein für das Gelingen der Energiewende dar. Des Weiteren sollte beachtet werden, dass auch marktliche Anpassungen einen Beitrag zur Hebung von Flexibilitätsoptionen leisten und zu einer Änderung des Bedarfs an Flexibilität führen können. Dabei beschränken sich Flexibilitätsoptionen nicht nur auf den Umwandlungssektor, sondern sind ein wichtiges Bindeglied zur Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Flexibilitätsoptionen umfassen somit flexible Erzeuger, Verbraucher, Speicher und Netze. Insbesondere letztere sind für das zukünftige Energiesystem von besonderer Bedeutung. So ist es wichtig zu erforschen, wie neue und bestehende Technologien die Leistungsfähigkeit, Stabilität und Flexibilität von Stromnetzen steigern können, um den Netzausbaubedarf zu verringern sowie den Netzbetrieb zu optimieren.

## 11. Querschnittsthema: Energiesystemanalyse

Die Energiesystemanalyse stellt ein wichtiges methodisches Instrument dar, um Maßnahmen und Wirkmechanismen bei der Transformation des Energiesystems im internationalen Umfeld zu untersuchen. Bislang liegt der Fokus der Systemanalyse meist auf dem energiepolitischen Zieldreieck und berücksichtigt noch zu wenig das Verhalten der unterschiedlichen Akteure. Zukünftig sollte die Systemanalyse umfassender gedacht werden und durch eine Erweiterung der Bewertungskriterien ganzheitlicher erfolgen. Das bedeutet, dass neben einer umfassenden Abbildung der technischen Aspekte auch gesellschaftspolitische Themen wie Akzeptanz adressiert und integrierte Betrachtungen ergänzt durch Lebenszyklusanalysen erfolgen sollten.

## 12. Förderformate

Die Bewältigung der vielfältigen Herausforderungen der Energiewende erfordert eine konzeptionelle Weiterentwicklung der Energieforschungsförderung in Deutschland, bei der neu und über bestehende Systematisierungen hinweg gedacht wird.

- a. Wirtschaft-, Sozial- und Rechtswissenschaften müssen umfassend in die Energieforschung integriert und verstärkt in systemischen Fragestellungen über Sektorgrenzen hinweg adressiert werden. In diesem Zusammenhang erscheint auch eine Ressort-übergreifende Ausgestaltung und Koordination der Forschungsförderung sinnvoll, die zugleich der Transparenz der Förderlandschaft zugutekommt.
- b. Die bekannten unterschiedlichen Formate der Energieforschungsförderung haben jeweils unterschiedliche Schwerpunkte. So sind zur Erreichung wichtiger übergreifender Ziele langfristig angelegte Großverbundprojekte ein adäquates

Mittel, während innovative Ansätze oft schneller über Einzelprojekte gefördert werden. Zur Berücksichtigung der besonderen Anforderungen von Startups und kleinen Unternehmen verbunden mit einer stärkeren Verankerung einer Gründerkultur in Deutschland scheinen auch neue bzw. angepasste Projektformate und -förderverfahren angezeigt. Eine Flexibilisierung der Forschungsförderung über beschleunigte Antrags- und Genehmigungsverfahren oder leichtere Möglichkeiten der Kombination von anwendungsorientierter und Grundlagen-Forschung und der Anpassung von Projektzielen erscheint dabei nicht nur zur Förderung junger Unternehmen sinnvoll.

- c. Reallabore können in der Energieforschung einen wichtigen Mehrwert bieten, um F&E-Ergebnisse durch die Interaktion mit dem Nutzer in realer Umgebung schneller in erfolgreiche Produkte und Services zu überführen.

# 1 Zielsetzung und Hintergrund

Das 6. Energieforschungsprogramm (EFP) wurde 2011 auf das damalige Energiekonzept der Bundesregierung zugeschnitten und hat seinerzeit wichtige Leitplanken zur Gestaltung der beginnenden Energiewende gesetzt. Es wurden neue strategische Wege in allen Handlungsfeldern der Forschungsförderung, mit einer großen Bandbreite an förderfähigen Technologien beschritten. Nach sieben Jahren Energiewende ist zu prüfen, ob sich wesentliche Änderungen der technischen, wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen ergeben haben, die im 6. Energieforschungsprogramm nicht vorhersehbar waren und bei einer Neuauflage berücksichtigt werden müssen.

Im BMWi-Leitprojekt „EnFo-2030 – Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende“ wurden in einer Top-Down-Analyse – ausgehend von einer sektoralen Betrachtung der Energiewende-Ziele – mögliche Eckpunkte in Form von Thesen für das 7. Energieforschungsprogramm erarbeitet. Die Studie orientiert sich dabei an den Zielen des bestehenden Energiekonzepts, an aktuellen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen und den sich daraus ergebenden neuen Anforderungen an die zukünftige Energieforschung. Die Thesen beschreiben in komprimierter Form den Status Quo und den Handlungsbedarf mit Blick auf die Energiewende sowie Handlungsoptionen in der Energieforschung.

Die Thesen wurden von einem Projektteam aus DLR, FfE e.V., ifo Institut und Universität Münster unter Federführung der Technischen Universität München erstellt. Das Projekt wurde von einem Beirat mit 14 Mitgliedern aus Industrie, Energiewirtschaft und Wissenschaft intensiv begleitet und mit dem parallelen BMWi-Leitprojekt „Technologien für die Energiewende“ (TF\_Energiewende) abgestimmt, welches in einem Bottom-Up-Ansatz die verfügbaren Technologien und deren technische und wirtschaftliche Verbesserungspotentiale erfasst hat.

Das Forschungsvorhaben EnFo-2030 wurde im Rahmen der Förderbekanntmachung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ im Förderschwerpunkt 3.14 „En:SYS – Systemanalyse für die Energieforschung“ beantragt, mit folgenden Schwerpunkten:

- Analyse technischer, ökonomischer, politischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen
- Anforderungen an die künftige Energieforschung (Identifikation von Forschungsbedarf nach Sektoren und Kriterien, Clusterung nach Themengebieten)
- Formulierung von Thesen

## 2 Vorgehensweise

Die im Projekt erarbeitete Vorgehensweise ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Methodik basiert auf drei wesentlichen Elementen, sektorspezifischen sowie sektorübergreifenden Steckbriefen, Maßnahmensteckbriefen und Thesen, und wird in den folgenden beiden Kapiteln eingehend erläutert.

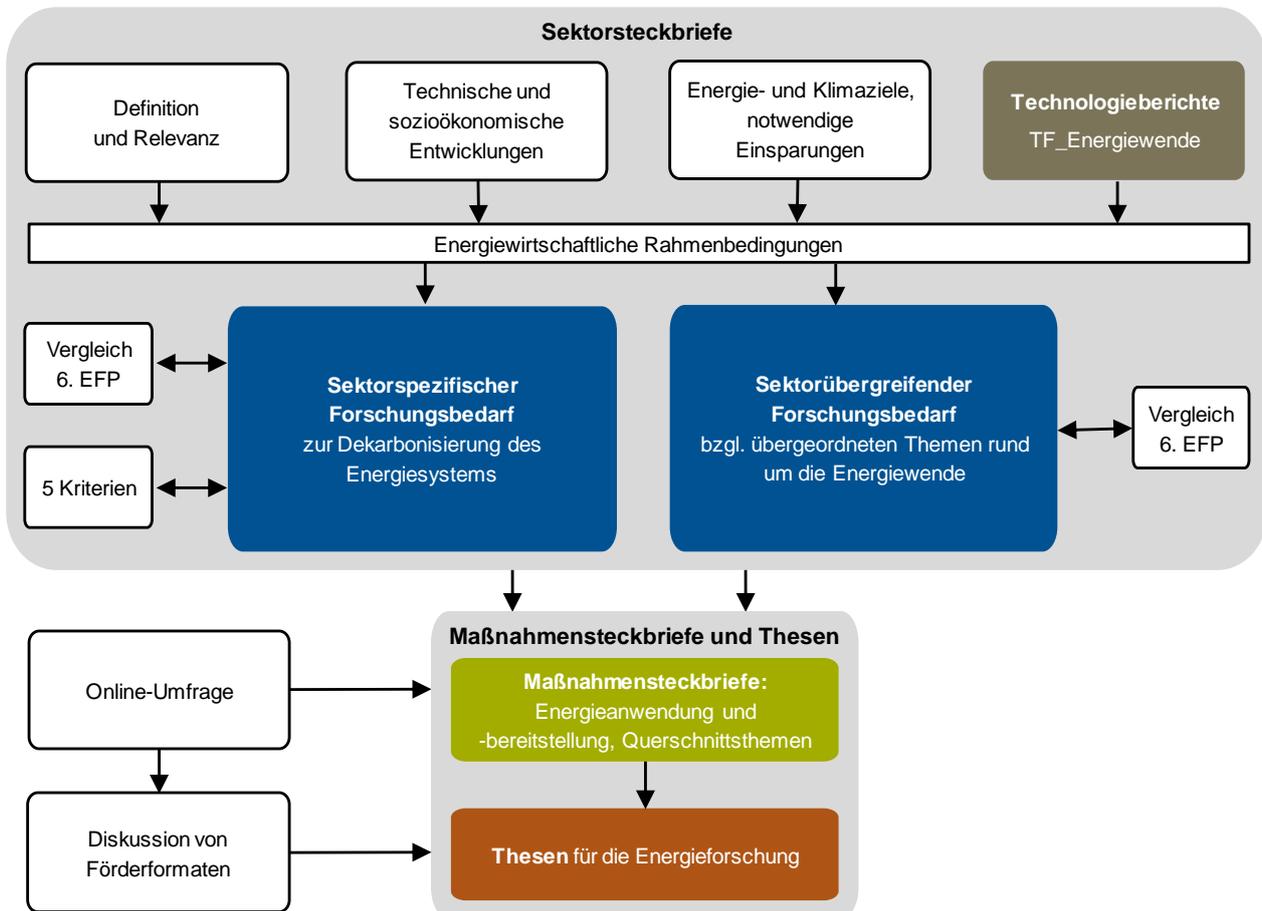


Abbildung 1: Vorgehensweise zur Bestimmung von Thesen für die Energieforschung

### 2.1 Sektorsteckbriefe

Zur Ableitung von Thesen für die Energieforschung wurde im Forschungsprojekt „EnFo-2030“ ein eigenständiger methodischer Ansatz entwickelt, siehe Abbildung 1. Den ersten und wesentlichen Schritt zur Identifikation des Forschungsbedarfs stellen die sogenannten Sektorsteckbriefe dar (s. blaue Felder). Diese wurden im Projekt erstellt, sind einzeln veröffentlicht und finden sich des Weiteren im Anhang dieses Berichts.

Unterschieden wird zwischen den **sektorspezifischen Steckbriefen** für den Energiebereitstellungssektor [1] sowie die vier Verbrauchersektoren Industrie [2], Haushalte [3], GHD [4], Verkehr [5] und einem **Steckbrief zu sektorübergreifenden Themen** [6]. Letzterer fasst Fragestellungen und Herausforderungen zusammen, die nicht allein einem Sektor zugeordnet werden können oder Schnittstellen zwischen verschiedenen Sektoren

betreffen. Thematisiert werden hier Fragestellungen rund um Chancen und Risiken der Digitalisierung, Voraussetzungen und Bedeutung neuer Geschäftsmodelle, Bedingungen und Treiber von Akzeptanz und Nachfrageverhalten sowie regulatorische Herausforderungen. Außerdem wird die Bedeutung eines energiesystemischen Ansatzes betont. Dazu zählen Flexibilitätsoptionen für das zukünftige sektorgekoppelte Energiesystem, insbesondere Speicher und Netze, und die Energiesystemanalyse zur erweiterten Betrachtung systemischer und sektorübergreifender Herausforderungen technischer, wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und ökologischer Art.

Es erfolgt zunächst eine Analyse der **energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen**. Ausgehend von einer konkreten Definition und Abgrenzung der einzelnen Sektoren und der sektorübergreifenden Themen wird die jeweilige energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung erörtert. Zudem werden die für Deutschland relevanten Energie- und Klimaziele, wie sie sich nach aktueller Gesetzeslage und anderen Rahmenbedingungen ergeben, gesammelt und für jeden Sektor dargestellt. Einen Ausgangspunkt dafür zeigt Abbildung 2, in der die sektorspezifischen Besonderheiten am Beispiel der anwendungsbezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich werden. Entsprechend dem Verursacherprinzip wurden in diesem Beispiel die Emissionen des Umwandlungsbereiches (Strom, Brenn- und Kraftstoffe, Fernwärme) auf die Sektoren und Anwendungen umgelegt. Die größten Anteile an energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen stellen dabei im Verkehrssektor mechanische Energie, in der Industrie Prozesswärme und mechanische Energie für stationäre Anwendungen sowie bei den privaten Haushalten und im GHD-Sektor Raumwärme dar.

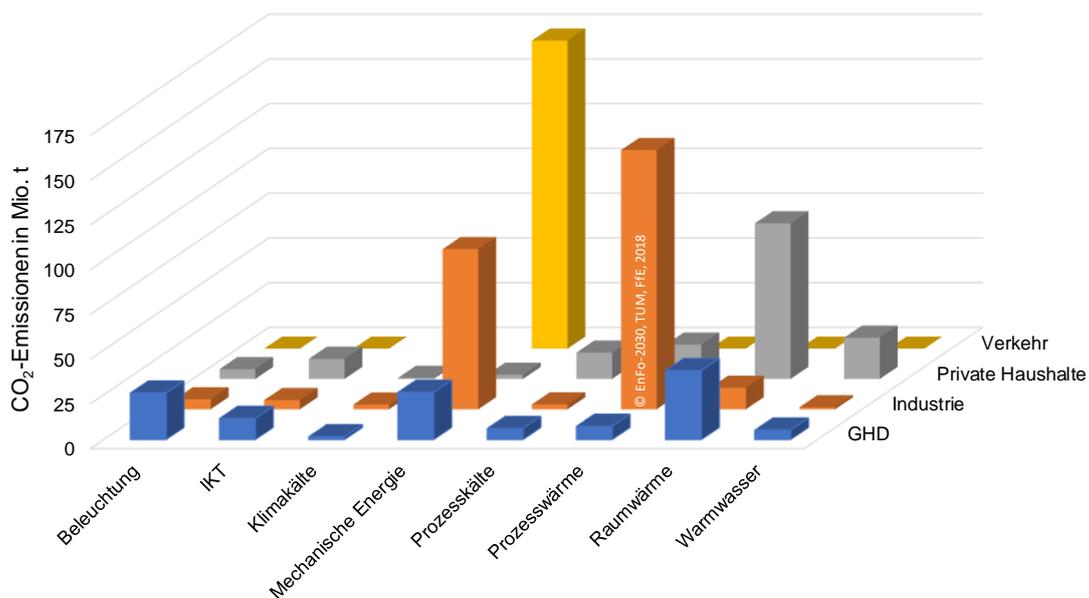
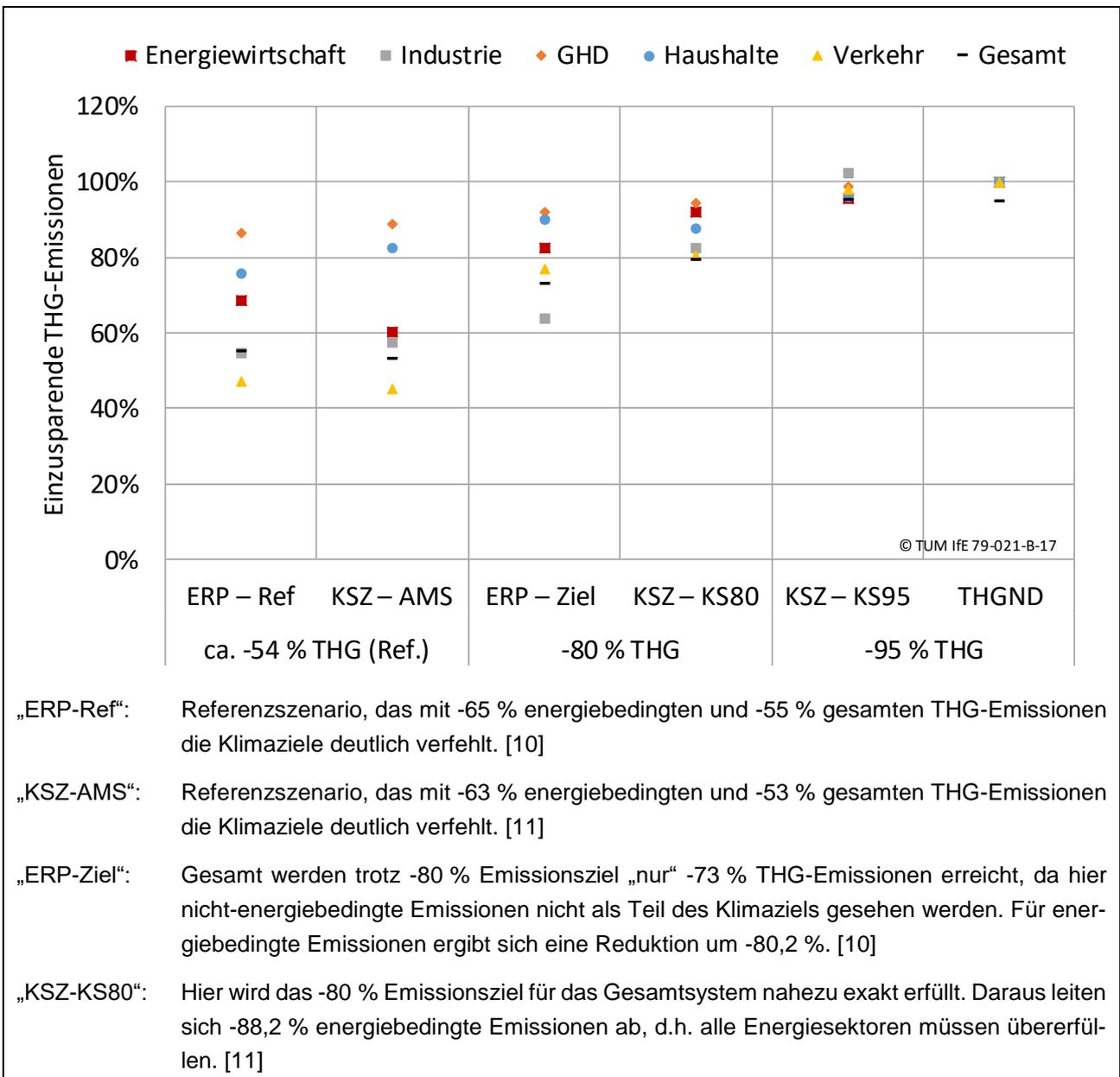


Abbildung 2: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Sektor und Anwendungsart 2014 [8]

Die Anpassungsherausforderungen, die sich im Rahmen der Energiewende und speziell der Dekarbonisierung für die verschiedenen Sektoren und Anwendungsarten ergeben, unterscheiden sich jedoch nicht nur hinsichtlich der reduzierenden Emissionen. Auch die technologischen Möglichkeiten und Kosten der Vermeidung variieren zum Teil erheblich. So zeigen aktuelle Energieszenarien, die die Beiträge verschiedener Sektoren zum erreichten Emissionsminderungsziel ausweisen, dass diese je nach Sektor sehr unterschiedlich ausfallen können (s. Abbildung 3). Deutlich wird jedoch auch, dass die Unterschiede sich mit zunehmendem Ambitionsniveau der Reduktionsziele immer weiter verringern. Die Ergebnisse sind zudem stark abhängig von der angewandten Sichtweise der Szenarien, d.h. ob nicht-energiebedingte Emissionen in die Rechnungen miteinbezogen werden oder nicht. Allgemein wird deutlich weniger Einsparpotential in nicht-energiebedingten als energiebedingten THG-Emissionen gesehen [9].



„KSZ-KS95“:	Energiebedingte Emissionseinsparungen liegen bei -98 %; damit folgen -95 % Emissionen für die Gesamtbilanz. [11]
„THGND“:	Hier wird eine komplette Einsparung energiebedingter Emissionen gefordert, um eine Gesamteinsparung von -95 % zu erreichen. [12]

Abbildung 3: Sektorale Aufteilung der einzusparenden THG-Emissionen bis 2050

Welcher Forschungsbedarf sich für die verschiedenen Sektoren und Anwendungen ergibt, kann jedoch nicht allein an den einzusparenden Emissionsmengen und -kosten festgemacht werden. Je nach Technologie können sich eine Reihe weiterer, relevanter Bewertungskriterien ergeben. Beispielhaft sei an dieser Stelle nur auf die Aspekte Flächenkonkurrenz, Ressourceneffizienz, Verteilungsfragen, Pfadabhängigkeiten, Importabhängigkeit, Resilienz, Versorgungssicherheit, Systemkompatibilität, erreichbare Wirkungsgrade, nichttechnische Hemmnisse, Akzeptanz und Sozialverträglichkeit sowie Flexibilität hingewiesen.

Nach Diskussion und Abstimmung mit dem Projektbeirat wurde diese vielfältige Sammlung an Aspekten auf fünf zentrale Kriterien kondensiert (vgl. Abbildung 4):

- Klima, Umwelt und Ressourcen
- Technische Aspekte
- Wirtschaftliche Aspekte
- Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte
- Versorgungssicherheit

Da keines dieser Kriterien vernachlässigbar bzw. per se von geringerer Bedeutung für die zukünftige Energieforschung ist, wurde keine Gewichtung vorgenommen.

Der Forschungsbedarf in den verschiedenen Sektoren und Anwendungen wurde mittels ausführlicher Literaturrecherchen, u.a. aus den Technologieberichten des Projekts TF\_Energiewende, systematisch anhand dieser Kriterien identifiziert. Im sektorübergreifenden Steckbrief lässt sich der Forschungsbedarf dabei weit weniger als in den sektorspezifischen Feldern über die oben genannten Kriterien einordnen. Zur Identifikation relevanter Eckpunkte und Themen zukünftiger Energieforschung wird daher an dieser Stelle noch stärker auf einschlägige Literatur und die Erfahrungen aus dem bisherigen Verlauf der Energiewende zurückgegriffen und der Forschungsbedarf qualitativ beschrieben.

Ausgehend vom identifizierten Forschungsbedarf erfolgt ferner ein **Abgleich mit dem 6. Energieforschungsprogramm (EFP)**, der sich aus der Bestandsaufnahme relevanter Themen im 6. EFP und deren Spiegelung zusammensetzt und der die Identifizierung neuer oder veränderter Schwerpunkte in der Energieforschung erlaubt. Die Sektorsteckbriefe weisen somit die jeweiligen themenspezifischen Herausforderungen für die Erreichung der Energie- und Klimaziele aus und definieren darauf aufbauend zentrale Forschungsthemen für das zukünftige Energiesystem.

<b>Forschungsbedarf</b>	KUR	T	W	GPR	V
Ermittlung des Potenzials, das Power-to-Heat (und die Hybridisierung der Wärmebereitstellung) zur Integration erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien und zur Treibhausgasverminderung liefern kann.	x				x
Ermittlung der technischen Möglichkeiten zur Hybridisierung industrieller Prozesse.		x	x		x
Einbindung von Power-to-Heat im Hochtemperatur-Bereich (z. B. induktiver Drehrohrofen in der Zementindustrie).		x	x	x	x
Erforschung und Umsetzung von Möglichkeiten zum Abbau von Hemmnissen bzgl. der Umsetzung von Power-to-Heat Lösungen.				x	
Identifikation der Systemrückwirkungen von Power-to-Heat-Maßnahmen und die Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit.		x	x		x

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

Abbildung 4: Auszug Sektorsteckbrief Industrie – Forschungsbedarf zu „Intelligentes Power-to-Heat“

## 2.2 Maßnahmensteckbriefe und Thesen

Auf Ebene der Maßnahmensteckbriefe (s. grüner Block in Abbildung 1) wird der Forschungsbedarf in aggregierter Form ausgewiesen. Dazu wird ein Perspektivwechsel vorgenommen. Anstelle einer sektoralen Gliederung erfolgt eine Clusterung nach grundsätzlichen Dekarbonisierungsmöglichkeiten, die im Energiesystem auf Seiten von Energieanwendung und Energiebereitstellung zur Verfügung stehen, sowie nach relevanten Querschnittsthemen (s. Tabelle 1). Leitgedanke war dabei eine weniger ressort- und stärker themenbezogene Ausgestaltung des 7. Energieforschungsprogramms. Somit könnte diese Strukturierung zur Gliederung des Forschungsprogramms geeignet sein.

Tabelle 1: Übergeordnete Kategorien der Maßnahmensteckbriefe

Energieanwendung	Energiebereitstellung	Sektorübergreifende Querschnittsthemen
Energieeffizienz	Konventionelle Kraftwerkstechnik	Digitalisierung
Elektrifizierung	Erneuerbare Energien	Verbraucherverhalten und Marktverbreitung von Innovationen
Brenn- und Kraftstoffsubstitution	Erneuerbare Brenn- und Kraftstoffe	Regulatorische Herausforderungen
		Flexibilitätsoptionen und Sektorkopplung
		Energiesystemanalyse

Zur Erstellung der **Maßnahmensteckbriefe** werden zunächst alle identifizierten Forschungsbedarfe aus den sektorspezifischen Steckbriefen und sektorübergreifenden Steckbriefen aufgelistet. In einem weiteren Schritt werden die Forschungsbedarfe den festgelegten Kategorien (s. Tabelle 1) zugeordnet und innerhalb dieser abstrahiert zusammengefasst (s. Abbildung 5).

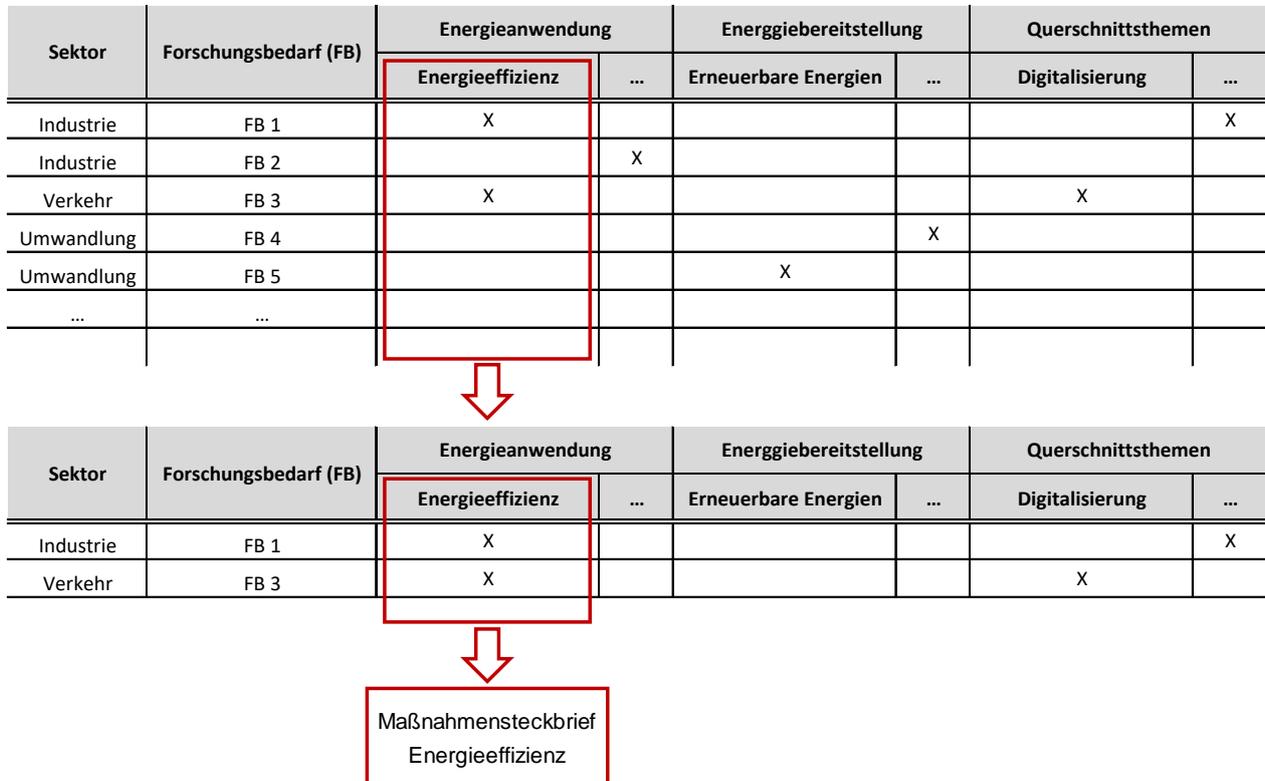


Abbildung 5: Hilfsmatrix zur Erstellung der Maßnahmensteckbriefe aus dem Forschungsbedarf

Diese abstrahierte Zusammenfassung innerhalb der Maßnahmensteckbriefe bildet die Grundlage für den iterativen Prozess zur Formulierung der **Thesen** als wichtigstes Kondensat dieser Zusammenfassung innerhalb der Maßnahmensteckbriefe und als zentrales Ergebnis dieses Forschungsprojekts. Dabei wurden die Thesen zusätzlich mit dem Projektbeirat abgestimmt und diskutiert. Die Thesen (s. oranger Block in Abbildung 1) beschreiben in kurzen Worten den Status Quo, den Handlungsbedarf aus Sicht der Energiewende sowie Handlungsoptionen mit Blick auf die Energieforschung. In den Thesen werden zudem **Förderformate** (u.a. Verbundprojekte und Start-Ups, s. Kapitel 4) der Energieforschung adressiert.

Diese Themen wurden außerdem in einer **Online-Umfrage** abgefragt, welche im Rahmen des strategischen Leitprojekts (EnFo-2030 und TF\_Energiewende) konzipiert und von BMWi und Projektträger Jülich durchgeführt wurde. Die von EnFo-2030 entwickelten Fragen decken die folgenden Themengebiete ab:

- Förderthemen: Abfrage der Wichtigkeit einzelner Forschungsbereiche

- Förderformate und Rahmenbedingungen: u.a. (Groß-)Verbundprojekte und Start-Ups
- Verwertung von Forschungsergebnissen: u.a. Hemmnisse eines schnellen Praxis-transfers, Überwindung des „Tals des Todes“

Als Beispiel ist das Umfrageergebnis zur Frage „Wie hoch ist Ihrer Meinung nach die Bedeutung der folgenden Bereiche für die Umsetzung der Energiewende?“ in Abbildung 6 dargestellt. Diese zeigt das Stimmungsbild der Umfrageteilnehmer hinsichtlich der Relevanz verschiedener Forschungsbereiche abhängig von der eigenen Zugehörigkeit zu einem Forschungsschwerpunkt. „Im Fragebogen waren 14 Bereiche aufgelistet, welche die Teilnehmer nach ihrer Bedeutung auf einer Skala von 1 (sehr gering) bis 5 (sehr hoch) bewerten sollten. Die Bewertungen reichen von 3 bis 4,6, keiner der Bereiche wurde als unwichtig bewertet [...]. Dabei bewerteten die Experten erwartungsgemäß Themenfelder als wichtiger, wenn diese das eigene Forschungsthema repräsentieren. Bei der Einordnung der Ergebnisse ist des Weiteren zu berücksichtigen, dass Experten aus den verschiedenen Themenfeldern derzeit noch unterschiedlich stark in den befragten Forschungsnetzwerken repräsentiert sind. Entsprechend spiegelt die durchschnittliche Bewertung bei unterrepräsentierten Themenfeldern wie IKT und Verkehr stärker die Einschätzung der Teilnehmer wider, die nicht in diesen Themenfeldern forschen.“ [7]

Beteiligt haben sich insgesamt 760 Experten v.a. aus den Forschungsnetzwerken Energie, wovon „33 % aus außeruniversitären Forschungseinrichtungen, 29 % aus Universitäten, 28 % aus Unternehmen (davon 4 % Start-ups) und 11 % aus Verbänden und sonstigen Einrichtungen“ [7] stammen.

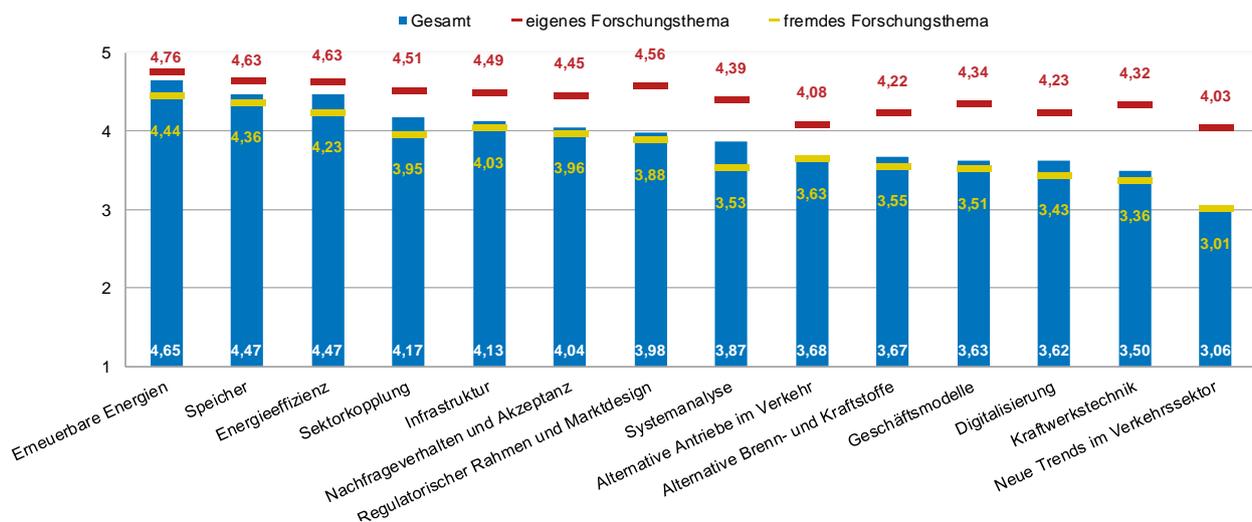


Abbildung 6: Auszug aus der Auswertung der Online-Umfrage – Frage: „Wie hoch ist Ihrer Meinung nach die Bedeutung der folgenden Bereiche für die Umsetzung der Energiewende?“ [7]

### 3 Maßnahmensteckbriefe

Die aus den Sektorsteckbriefen hergeleiteten Maßnahmensteckbriefe werden nachfolgend dargestellt. Diese enthalten die abstrahierte Zusammenfassung des identifizierten Forschungsbedarfs nach dem Vorgehen in Abbildung 5 und sind nach den in Tabelle 1 gezeigten Kategorien (Energieeffizienz, Elektrifizierung, ...) innerhalb der drei Bereiche Energieanwendung, Energiebereitstellung und Querschnittsthemen gruppiert. Die in jedem Maßnahmensteckbrief aufgeführten Gesichtspunkte liegen der jeweiligen These zugrunde und erläutern diese zugleich. Zur besseren Übersicht werden die Thesen im Folgenden aus dem Kapitel „Executive Summary – Thesen“ übernommen und den einzelnen Maßnahmensteckbriefen vorangestellt (s. Kasten).

#### 3.1 Energieanwendung: Energieeffizienz

*Eine weitere Steigerung der Energieeffizienz für alle Anwendungen erneuerbarer und konventioneller Energien ist unverändert von sehr hoher Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele. Dabei spielen im Gebäudebereich besonders Maßnahmen zur Reduktion des Raumwärmeverbrauchs (Energetische Modernisierung, Wärme-/Kältebereitstellung), im Verkehr bei mechanischer Energie (u.a. Elektromobilität), in der Industrie bei Prozesswärme (Querschnitts- und Prozesstechnologien) eine Rolle. Neben den technologischen Herausforderungen sollen zukünftig Effizienzpotentiale kritisch evaluiert und auch nicht-technische Umsetzungshemmnisse verstärkt erforscht werden.*

- Die Gebäudesanierung ist ein fundamentaler Baustein der energetischen Modernisierung. Hierbei besteht Forschungsbedarf z.B. hinsichtlich multifunktionaler Hochleistungsdämmstoffe und Fassadenelemente, welche zudem auch ökologisch verträglich sein sollen. Großes Gewicht kommt der Umsetzung bekannter Effizienzmaßnahmen zu: Mittels Planungs- und Sanierungsleitfäden kann die Information bezüglich Sanierungsmaßnahmen, welche auch zur Reduktion von Sanierungshemmnissen (z.B. wirtschaftliche Rentabilität) beitragen, gesteigert werden.
- Thermische Speicher werden ein wesentlicher Bestandteil der Wärmebereitstellung im Gebäudebereich. Hier gibt es noch Forschungsthemen in Zusammenhang mit der Reduktion von Wärmeverlusten, Erhöhung des Speichervermögens durch optimierte Speichermaterialien, Konzepten zur Nutzung der Gebäudemasse und alternativer thermischer Speicherkonzepte (z.B. PCM, thermo-chemische/thermo-physikalische Speicher).
- Systemkonzepte auf Grundlage von Umweltwärme können in der Zukunft einen wesentlichen Anteil der Wärmebereitstellung (Raum- und Prozesswärme) übernehmen. Dabei sind neben Wärmepumpensystemen (vgl. Maßnahmensteckbrief „Elektrifizierung“, Abschnitt 3.2) solarthermische Anlagen von großer Bedeutung.

Für diese Anlagen sollten detaillierte Untersuchungen zur Integration in den Produktionsablauf in der Industrie durchgeführt werden, mit dem Ziel Branchenkonzepte zu entwickeln. Des Weiteren sind die Weiterentwicklung von Kollektortechnologien (z.B. Solarluftkollektoren, photovoltaisch-thermische Hybridkollektoren, Kollektoren mit Wärmespeicherfunktion), Einsatz in Wärmepumpensystemen und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit wichtig.

- Parallel zur Nutzung der Umweltwärme ist auch die Abwärmenutzung besonders in industriellen Prozessen von großer Relevanz. Hier gibt es vor allem Handlungsbedarf bei der Entwicklung branchenspezifischer Abwärmenutzungskonzepte, um eine höhere Durchdringung im Industriesektor zu erreichen. Dabei spielen die Nutzbarmachung niedriger Temperaturniveaus zur Verstromung ( $< 100\text{ °C}$ ) mittels standardisierter Integration von NT-Prozessen (ORC, Kalina, Stirling) in energieintensiven Anlagen sowie thermoelektrische Generatoren (Erhöhung Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit) zur Prozesswärmenutzung eine bedeutende Rolle.
- Forschungsbedarf bei der Bereitstellung von Klima- und Prozesskälte besteht bei der Weiterentwicklung und Steigerung der Umwandlungseffizienz von Ab- und Adsorptionskältemaschinen, Optimierung von Komplettsystemen (z.B. Regelstrategien, Monitoring) sowie der Erforschung neuer Verfahren zur Kälteerzeugung.
- Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz von mechanischen Prozesstechnologien (z.B. effizientere Refiner in der Papierindustrie) sowie Möglichkeiten zur Substitution bisheriger Verfahren durch effizientere Alternativen sollten erforscht werden.
- Im Verkehrssektor kommen zunehmend neue Mobilitätskonzepte (z.B. Autonomes Fahren, elektrisches Fliegen, Vernetzung des Verkehrs) zum Einsatz. Hier gilt es diese auf Energieeffizienz zu evaluieren und Energieeinsparpotentiale zu ermitteln. Des Weiteren besteht Forschungsbedarf im Bereich der Elektromobilität bei allen technischen Komponenten des elektrischen Antriebs, der Ladeinfrastruktur und der Batterie sowie bei der Reduktion von Fahrwiderständen hinsichtlich Effizienzsteigerung sowie System- und Betriebsoptimierung.
- Durch  $\text{CO}_2$ -Abscheidung und -Nutzung (engl. Carbon Capture and Utilization (CCU)) können die  $\text{CO}_2$ -Emissionen industrieller Anlagen stark vermindert werden. Im Zusammenhang mit der Anwendung von CCU existieren jedoch eine Reihe ungeklärter technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Fragen. Dabei sollten aktuelle und zukünftige  $\text{CO}_2$ -Abscheidungs- und Verwertungspotentiale ermittelt, technische und wirtschaftliche Möglichkeiten zur Erhöhung der Effizienz und großtechnischen Umsetzung erforscht und gesundheitliche Gefahrenpotentiale analysiert werden.

## 3.2 Energieanwendung: Elektrifizierung

*Die Elektrifizierung unterstützt die Integration der Erneuerbaren Energien und wird mit deren Ausbau in Kombination mit Flexibilitätsoptionen weiter an Bedeutung gewinnen. Energieeffiziente Wärmeerzeugung in Form von Power-to-Heat Anwendungen, wie Wärmepumpen oder industriellen Elektrowärmeverfahren, und Elektrifizierung des Verkehrs in Kombination mit einer leistungsfähigen elektrischen Ladeinfrastruktur substituieren fossile Energieträger. Mehr noch als früher stellen damit bei der Elektrifizierung einerseits die Weiterentwicklung einzelner Technologien (z.B. Batterien für Elektrofahrzeuge) und andererseits die Systemintegration inklusive Sicherstellung der Versorgungssicherheit Herausforderungen für die Energieforschung dar.*

- Für Power-to-Heat Anwendungen sind im Sektor GHD und private Haushalte zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser besonders Wärmepumpen relevant. Dort besteht hinsichtlich Effizienz (System und Komponenten), Temperaturniveaus, Kosten, Umweltverträglichkeit (z. B. Kältemittel) und Integration in Lastmanagementsysteme Forschungsbedarf.
- In der Industrie kommen Power-to-Heat Anwendungen vor allem zur Prozesswärmeerzeugung (z. B. flexibel regelbare induktive, konduktive und kapazitive Elektrowärmeverfahren) zum Einsatz. Es besteht Forschungsbedarf bei der Integration in hybride Prozesswärmebereitstellung (z. B. Strom, Abwärme, KWK, Solarthermie) und Anwendungen in höheren Temperaturbereichen, ggf. mit Hochtemperatur-Wärmespeichern.
- Die Elektrifizierung des Verkehrs führt durch den Umstieg auf Elektromotoren zu einer Verringerung des Endenergieverbrauchs im Verkehr. Forschungsbedarf besteht hauptsächlich in den Bereichen der Infrastruktur (Schnellladetechnologien, Einbindung von Schnellladeinfrastruktur ins Stromnetz, flächendeckende öffentliche Ladeinfrastruktur) und Entwicklung von neuen Speichertechnologien für E-Fahrzeuge zur Erreichung erhöhter Reichweiten sowie deren Recycling. In diesem Zuge sind auch optimierte Ladestrategien von Elektrofahrzeugen unter anderem mit Vehicle-to-Grid Technologien von Bedeutung.
- Stromspeicher in Gebäuden können bei steigender Elektrifizierung helfen, das Stromnetz zu stabilisieren und das Potential an Erneuerbaren Energien weiter auszuschöpfen. Dafür muss an Zyklenfestigkeit, an der Weiterentwicklung von Redox-Flow-Batterien und an Superkondensatoren weiter geforscht werden.
- Durch die Elektrifizierung konventioneller Anwendungen ergibt sich die Möglichkeit, diese intelligent in lokale Energiemanagementsysteme einzubinden. Hier besteht Forschungsbedarf bei der Optimierung von Steuer- und Regelungskonzepten im Gebäudesystem, bei der Smart-Grid-Fähigkeit und bei der Maximierung der Ausnutzung lokaler Erneuerbarer Energiebereitstellung.

### 3.3 Energieanwendung: Brenn- und Kraftstoffsubstitution

*Die Substitution fossiler durch alternative Brenn- und Kraftstoffe in allen Anwendungssektoren stellt eine wichtige Möglichkeit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen dar. Dabei spielen alternative Kraftstoffe aus regenerativen Energieträgern eine wesentliche Rolle. Zudem besteht Forschungsbedarf bei der Konzeption einer effizienten, bedarfsorientierten und flächendeckenden Infrastruktur für alternative Kraftstoffe im Verkehrsbe- reich und der sich hieraus ergebenden Pfadabhängigkeiten (z.B. Ausbau von Strom- und Wasserstoffinfrastruktur). In industriellen Prozessen steht z.B. die energetische und stoffliche Nutzung alternativer Brennstoffe für Prozesswärmeanwendungen oder innovative KWK-Techniken im Fokus.*

- Zu den alternativen Brenn- und Kraftstoffen gehören unter anderem Biokraftstoffe (z.B. Bioethanol, Biodiesel), Erdgas (CNG), Flüssiggas (LPG), synthetische Kraftstoffe (z.B. Power-to-Liquid-Kraftstoffe, Biomass-to-Liquid-Kraftstoffe, Gas-to-Liquid-Kraftstoffe) und Wasserstoff. Außerdem kann in diesem Kontext Elektrizität im Gegensatz zu den konventionellen Brenn- und Kraftstoffen zu den alternativen Energieträgern gezählt werden.
- Alternative Brenn- und Kraftstoffe verursachen eine Nutzungskonkurrenz zwischen Verkehrssektor, Stromsektor, Wärmebereitstellung und Nahrungsmittelversorgung. Dies ist für den jeweiligen Anwendungsfall zu berücksichtigen.
- Im Verkehrssektor ist der Austausch fossiler durch alternative (erneuerbare) Brennstoffe bei allen Verkehrsträgern (d.h. Luft-, Schiene, Schiff und Straßenverkehr) des Personen- und Güterverkehrs notwendig. Für den Flug- und Schiffsverkehr soll die Forschung an synthetischen Brennstoffen fortgesetzt werden. Des Weiteren sind Untersuchungen zum elektrischen Fliegen notwendig. Zusätzliche Forschungsbereiche für synthetische Kraftstoffe sind die Steigerung des Wirkungsgrads und die Reduktion der Herstellungskosten.
- Die Umstellung der deutschen Fahrzeugflotte hin zu alternativen Antrieben benötigt die Weiterentwicklung von Elektrofahrzeugen sowie von Fahrzeugen, die alternative flüssige und gasförmige Kraftstoffe nutzen (z.B. Wasserstoff, CNG, LPG). Darüber hinaus müssen die Einflüsse und Auswirkungen von neuen Fahrzeug- und Mobilitätskonzepten (z.B. autonomes Fahren, Robotaxis, Carsharing) auf alternative Brenn- und Kraftstoffe hinsichtlich eines eventuell veränderten Bedarfs sowie neuem Tankverhalten und Fahrprofilen erforscht werden.
- Ergänzend müssen Ausbaustrategien der Infrastruktur (v.a. für straßengebundenen Verkehr) für alternative Kraftstoffe erforscht werden, da eine effiziente, bedarfsorientierte, flächendeckende Infrastruktur für den Erfolg von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben sowie der Sektorkopplung entscheidend ist.

- Weiterer Forschungsbedarf im Verkehrssektor besteht bei der Nutzerakzeptanz von Biokraftstoffen, Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen.
- Darüber hinaus ist die Brenn- und Kraftstoffsubstitution wichtig für die Sektoren private Haushalte, Industrie und GHD. Dazu sind das verfügbare Potential, der Bedarf und die Nutzungspotentiale von alternativen Brenn- und Kraftstoffen in diesen Sektoren zu untersuchen. Die notwendigen Mengen nicht-strombasierter Wärme- und Kälteversorgung und der Nutzen von Hybrid-Lösungen sind ebenfalls zu betrachten.
- Forschungsbedarf besteht zudem bei der energetischen und stofflichen Nutzung erneuerbarer Brennstoffe in industriellen Prozessen und der Wärmebereitstellung durch Biomasse (z.B. Prozesswärmeanwendungen oder innovative KWK-Techniken). Weitere Forschungsbereiche sind die technischen Möglichkeiten zur Hybridisierung industrieller Prozesse, die Hybridisierung der Wärmebereitstellung und die Integration erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien.
- Chemische Grundstoffe und die Hochtemperaturwärme sind weitere Forschungsgebiete im Bereich der synthetischen Kraftstoffe. Dabei ist die (Kosten-)Effizienz synthetischer Kraftstoffe mit zu betrachten.

### 3.4 Energiebereitstellung: Konventionelle Kraftwerkstechnik

*Das Stromsystem der Zukunft muss hochflexibel sein, um schnell auf geänderte Residualzustände durch fluktuierende Anteile Erneuerbarer Energien reagieren zu können und somit den gewohnten Standard an Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Dafür müssen emissionsarme thermische Kraftwerke bereitgehalten werden. Forschungsbedarf besteht in der Anpassung und Optimierung der Kraftwerke im Hinblick auf schnelle Lastzyklen, hohe Teillastwirkungsgrade, geringen Leerlaufbedarf, niedrige Mindestleistung und flexiblen Brennstoffeinsatz. Schwerpunkte zukünftiger Forschung sind neue Materialien, optimierte Komponenten und Betriebsweisen sowie das Zusammenspiel verschiedener zentraler und dezentraler Kraftwerkstypen mit Speichern und Netzen in einem komplexen Energiesystem.*

- Zu den konventionellen Kraftwerkstechniken zur Erzeugung von Strom und Wärme gehören Kohlekraftwerke, Gasturbinen, Gasmotoren und Brennstoffzellen. Energiesysteme, die in GHD, Industrie und Haushalten eingesetzt werden, zählen nicht dazu. Während konventionelle Gas- und Kohlekraftwerke heute überwiegend zur Deckung der Grundlast eingesetzt werden, besteht mittelfristig eine wesentliche Aufgabe in der Bereitstellung von Regelenergie und als Reservekraftwerke.
- Kurzfristige Flauten von Wind- und Solarenergie können durch einen weiteren Ausbau von Speicherkapazitäten wie Batterien und Pumpspeicherkraftwerken ausgeglichen werden, längerfristige Engpässe bei Erneuerbaren Energien („Dunkelflaute“)

müssen durch thermische Kraftwerke kompensiert werden, die schnell und möglichst emissionsarm einsetzbar sind.

- Von thermischen Kraftwerken ist zukünftig große Variabilität beim Brennstoffeinsatz gefordert. Neben fossilen Brennstoffen – vorzugsweise Erdgas – kommen hier unterschiedliche biogene und synthetische Brennstoffe in Betracht. Insbesondere dezentrale Anlagen können sowohl mit fossilen als auch regenerativen Brennstoffen betrieben werden.
- Forschungsmaßnahmen im Bereich konventioneller Kraftwerke betreffen unter anderem Regelkonzepte, Minimierung der Mindestlast, hohe Teillastwirkungsgrade und Verkürzung von An- und Abfahrvorgängen. Technische Systeme müssen in allen Lastzuständen und insbesondere bei schnellen Lastwechseln ohne Störungen arbeiten.
- Forschungs- und Entwicklungsaufgaben liegen im Bereich der Werkstoffe, besserer Brennerkonzepte, Optimierung der thermodynamischen Kreisläufe, Reduktion von Verlusten sowie Optimierung der Steuerungssysteme. Neben der Flexibilisierung des Energiesystems gehören zur Versorgungssicherheit im Bereich Energiewandlung die Zuverlässigkeit und Stabilität der Komponenten, sowie die Erzeugung und Nutzung von speicherbaren Brennstoffen. Für die Versorgungssicherheit sind neben Speichern insbesondere flexible thermische Kraftwerke notwendig.
- Ein entscheidender Faktor für das Energiesystem der Zukunft ist seine Wirtschaftlichkeit, die durch eine Verbesserung von Wirkungsgraden in Kraftwerken unter sämtlichen Betriebszuständen sowie durch eine Kostenreduktion in der gesamten Wertschöpfungskette erreicht wird.
- Die Gestaltung von Geschäftsmodellen sowie eines regulatorischen Rahmens, um Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung zu gewährleisten, muss untersucht werden.

### 3.5 Energiebereitstellung: Erneuerbare Energien

*Im gesamten Energiesektor, insbesondere jedoch für Wind- und Solaranlagen, besteht weiterhin Forschungsbedarf für die Steigerung des Systemwirkungsgrads, Erhöhung der Lebensdauer kritischer Komponenten und Kostenreduktion durch neue Materialien und Herstellungsverfahren. Ebenso sollte die Energieforschung auf technische Maßnahmen zur Reduktion von Hemmnissen bei der Errichtung von Erneuerbaren Energie-Anlagen abzielen, wie z.B. die Reduktion von Flächenverbrauch sowie Schall- und Geruchsemissionen.*

- Hemmnisse bei der Errichtung regenerativer Erzeugungsanlagen in Siedlungsnähe (PV, Wind, Biomasse, Wasserkraft, Geothermie) sollen z.B. durch geringeren Flächenverbrauch und bessere optische Integration in die Umgebung (z.B. Entwicklung

von bauwerksintegrierten Photovoltaik-Elementen wie Fassadenelementen), oder durch Verringerung der Schallemissionen (insbesondere von Windkraftanlagen) abgebaut werden.

- Bei Windkraftanlagen ist eine Erhöhung der Effizienz durch größere Anlagen, verbesserte Aerodynamik (z.B. „Smart Blades“) und Weiterentwicklung im Bereich der Generatoren und Leistungselektronik zu erreichen.
- In der Photovoltaik ist heute erst ein Bruchteil des theoretisch erzielbaren Wirkungsgrades erreicht. Fortschritte lassen sich durch verbesserte Produktionsverfahren und neuartige Photovoltaikzellen erzielen. Weiterhin besteht Forschungsbedarf für die Steigerung des Systemwirkungsgrads bei PV Anlagen.
- Wichtige Aspekte der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit von Erneuerbaren-Energien-Anlagen sind Verringerung von Materialeinsatz, Kostenreduktion bei der Herstellung und Erhöhung der Lebensdauer von Anlagen und Komponenten.
- Forschungsmaßnahmen für alle Erneuerbaren Energien betreffen die Entwicklung von Werkstoffen für mechanische Komponenten und Halbleiter, Herstellungsverfahren von Komponenten und Anlagen und Optimierung von Regelungskonzepten.
- Um Erneuerbare Energien möglichst effizient erzeugen zu können, ist die Standortauswahl für Anlagen, vor allem bei Wind- und Wasserkraftanlagen sowie bei der Geothermie von zentraler Bedeutung. Daher müssen Verfahren zur Standortfindung und zur Bewertung der Standorte hinsichtlich der Windverhältnisse (für Windenergie) und neuartige Erkundungsmethoden zur Senkung des Fündigkeitsrisikos bei Geothermie-Anlagen erforscht werden.

### 3.6 Energiebereitstellung: Erneuerbare Brenn- und Kraftstoffe

*Biogene Brenn- und Kraftstoffe werden zur Substitution fossiler Brennstoffe beitragen. Ein zentrales Element für die Versorgungssicherheit werden neben elektrischen und thermischen Speichern synthetische speicherbare Brennstoffe aus Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Technologien sein. Hier besteht zusätzlicher Forschungsbedarf. Neben gasförmigen (z.B. Wasserstoff) spielen flüssige chemische Energieträger eine wichtige Rolle, weil mit ihnen hohe Energiedichten und lange Speicherdauern erzielt werden können. Um Power-to-X-Technologie in technischem Maßstab anzuwenden, müssen optimale Herstellungsverfahren und Prozessrouten (inkl. Erschließung geeigneter CO<sub>2</sub>-Quellen) ermittelt und Wirkungsgrade verbessert werden, sowie ein Upscaling der Anlagen und deren Integration in das Energiesystem erreicht werden. Ebenso sind Verfahren zur Bewertung der Brennstoffe hinsichtlich ihrer technischen, ökologischen und ökonomischen Nutzung zu entwickeln.*

- Konventionelle und alternative Brennstoffe sind sektorübergreifend für Mobilität und die Versorgung mit Strom und Wärme in allen Bereichen unverzichtbar. Für die Erreichung der Klimaziele kommen langfristig Biobrennstoffe und synthetische nicht-fossile Brennstoffe in Betracht. Für Biomasse-basierte Brennstoffe besteht Forschungsbedarf bei Aufbereitung und Reinigung von Brennstoffen.
- Forschungsmaßnahmen für Biomasse-basierte Brennstoffe betreffen vor allem die effiziente Herstellung und Nutzung der Brennstoffe sowie die Steigerung der Brennstoffqualität.
  - Nutzung schwachkaloriger Abfall- und Prozessgase
  - Prozess-Optimierung inkl. Nutzung der Abwärme
  - Erschließung weiterer Biomasse-Quellen (Rest- und Abfallstoffe)
  - Erhöhung der Effizienz und Biogas-Ausbeute, Erhöhung der Reinheit der Gase und Einspeisung in das Erdgas-Netz
- Synthetische Brennstoffe, die aus Wasser und CO<sub>2</sub> mit Hilfe von Erneuerbaren Energien hergestellt werden (Power-to-Gas und Power-to-Fuel) sind ein Forschungsfeld mit großem Potential für CO<sub>2</sub>-Einsparungen und insbesondere für die Versorgungssicherheit. Forschungsmaßnahmen für synthetische Brennstoffe betreffen alle Schritte der Herstellungsverfahren, Effizienzsteigerung, Upscaling der Anlagen und Integration in das Energiesystem, sowie Verfahren zur Bewertung der Brennstoffe hinsichtlich ihrer Nutzung.
  - Untersuchung und Bewertung unterschiedlicher Prozessrouten
  - Entwicklung effizienter Katalysatoren mit reduzierten Edelmetallanteilen
  - Entwicklung großskaliger Elektrolysesysteme
  - Erschließung geeigneter CO<sub>2</sub>-Quellen
  - Kostenreduktion für Anlagen und Betrieb
  - Bewertung des Verbrennungsverhaltens synthetischer Brennstoffe bei Rückverstromung oder im Verkehrssektor
  - Entwicklung von Design-Tools für die Optimierung von synthetischen Brennstoffen

### 3.7 Querschnittsthema: Digitalisierung

*Die Digitalisierung durchdringt alle Lebens- und Wirtschaftsbereiche und verändert die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen grundlegend. Die Energieforschung muss diese veränderten Wechselwirkungen zwischen dem Energiesystem und den weiteren Wirtschaftsbereichen aufgreifen und so ein möglichst ganzheitliches Verständnis der Implikationen der Digitalisierung für die Energiewende fördern. Die vielfältigen Chancen der Digitalisierung zur Effizienzsteigerung und Flexibilisierung im Energiesystem müssen ebenso betrachtet werden wie Änderungen in Akteursstruktur und -verhalten und neue*

*Herausforderungen mit Blick auf Ressourceneffizienz, Datenschutz sowie Cybersicherheit und Resilienz der zusätzlich informationstechnisch vernetzten Versorgungsinfrastruktur.*

- Die Digitalisierung verändert bestehende und schafft neue Geschäftsmodelle entlang der gesamten energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette. Zugleich öffnet sie den Energiemarkt für neue branchenfremde Anbieter und setzt so etablierte Marktteilnehmer neuer Konkurrenz aus.
- Automatisierung, Vernetzung und intelligente Steuerung sowie die Möglichkeiten der Übertragung von Echtzeitinformationen versprechen die Energieeffizienz und die Flexibilität des Versorgungssystems insgesamt zu steigern. Potentiale der Sektorkopplung können leichter ausgeschöpft und auch eine Vielzahl dezentraler Anwender und Erzeuger systemdienlicher koordiniert werden. Mit Blick auf die Implikationen der Digitalisierung für die Energienachfrage sind auch weitergehende wirtschaftliche und gesellschaftliche Veränderungen zu beachten, wie etwa die Veränderung von Produktionsstrukturen durch neue digital gestützte Produktionsverfahren, autonome Fahrzeuge oder auch die Substitution von Arbeit durch zunehmende Möglichkeiten der Automatisierung. Insgesamt kann die Digitalisierung so die gesamte Struktur der Energienachfrage sowohl räumlich als auch zeitlich verändern. Wie stark und in welcher Form ist bislang allerdings noch weitgehend ungeklärt.
- Den technischen Effizienzpotentialen gegenüber stehen der Energie- und Ressourcenverbrauch der neuen digitalen Technologien selbst und mögliche Rebound-Effekte, etwa im Mobilitätssektor, die bislang nur begrenzt verstanden sind.
- Gerade bei der Verbreitung von Ansätzen zur intelligenten Steuerung von Energieanwendungen können zudem teils erhebliche nicht-technische Umsetzungshemmnisse bestehen. Auf Verbraucherseite sind etwa mögliche Akzeptanzprobleme zu analysieren, wenn Verhaltensgewohnheiten angepasst werden müssen. Verschärfend kann hinzukommen, dass Verbraucher sich durch die Ansätze intelligenter Anwendungssteuerung überwacht und in ihrer Entscheidungsautonomie eingeschränkt sehen (vgl. auch unten „Verbraucherverhalten und Marktverbreitung von Innovationen“). Hier stellen sich auch Fragen nach geeigneten regulatorischen Rahmenbedingungen, die ausreichende bzw. entsprechend systemdienliche wirtschaftliche Anreize setzen müssen.
- Vor dem Hintergrund der zunehmenden Abhängigkeit von fluktuierenden Energiequellen trägt die Digitalisierung mit der Steigerung der Flexibilität des Versorgungssystems, aber auch durch verbesserte Last- und Wetterprognosen zur Versorgungssicherheit bei. Die zunehmende Integration von verteilten Anwendungen in

das Versorgungssystem bei gleichzeitiger stärkerer (informationstechnischer) Vernetzung von Sektoren und Anwendungen schafft jedoch neue Anfälligkeiten gegenüber technischen Störungen und (internationalen) Angriffen auf die systemkritische Energieinfrastruktur, die bislang nur eingeschränkt verstanden und entsprechend auch nur unzureichend über technische und regulatorische Maßnahmen adressiert werden.

- Mit fortschreitender Digitalisierung nimmt auch die Bedeutung von Daten für den Betrieb des Energiesystems und energiewirtschaftliche Geschäftsmodelle zu. Zur Förderung neuer Geschäftsmodelle und des Wettbewerbs auf dem Energiemarkt sind dabei insbesondere die regulatorischen Rahmenbedingungen so weiterzuentwickeln, dass ein diskriminierungsfreier Zugang zu Daten bei gleichzeitig hohem Datenschutz gewährleistet werden kann. Das Vertrauen in effektiven Datenschutz stellt zugleich eine wichtige Voraussetzung für die (Markt-)Akzeptanz digitalisierter, vernetzter Anwendungen bei privaten Verbrauchern und Unternehmen dar.

### **3.8 Querschnittsthema: Verbraucherverhalten und Marktverbreitung von Innovationen**

*Das Gelingen der Energiewende hängt maßgeblich von der Marktverbreitung innovativer Energietechnologien und -dienstleistungen ab, aber auch von der Veränderung bestehender Energieverbrauchsgewohnheiten. Vor diesem Hintergrund sollte die Energieforschung nicht nur technische Herausforderungen und privatwirtschaftliche Kosten einzelner Technologien in den Blick nehmen. Vielmehr sollten künftig auch sozioökonomische Treiber der Marktverbreitung von Innovationen sowie das Zusammenspiel von Innovationen und Energieverbrauchsverhalten unter Berücksichtigung verhaltensökonomischer und psychologischer Besonderheiten analysiert und stärker in der Technologieentwicklung berücksichtigt werden.*

- Zu den Besonderheiten des Energieverbrauchsverhaltens zählt, dass Energie vielfach als dauerhafte Dienstleistung wahrgenommen wird, unter anderem da derzeit Energieverbrauch und -kosten in der Regel nur sehr eingeschränkt beobachtet werden können. Änderungen des Verbrauchsverhaltens stehen zudem häufig verfestigte Verhaltensgewohnheiten im Weg. Zu beachten ist auch, dass diese Verhaltensgewohnheiten aus dem Zusammenspiel vieler einzelner Handlungen resultieren können und Verhaltensänderungen so konsistente Anpassungen von Handlungsketten erfordern, die der Verbraucher oft nicht überblickt. Schließlich können nicht zuletzt diese Charakteristika zu Abweichungen vom erwarteten Verhalten „rationaler“ Energieverbraucher führen, indem etwa Entscheidungen mit Hilfe vereinfachender Heuristiken getroffen werden.

- Die Besonderheiten des Verbraucherverhaltens bei Energie, damit zusammenhängende Fragen der (Markt-)Akzeptanz, und teils erhebliche Informationsdefizite der Verbraucher und Anwender beeinflussen die Marktverbreitung von Innovationen im Energiebereich, die Wirkung regulatorischer Maßnahmen und die tatsächlich realisierbaren Potentiale von Technologien und Dienstleistungen zur Dekarbonisierung des Energiesystems beizutragen.
- Realisierbare Effizienz- und Flexibilisierungs-Potentiale im Bereich der Energienachfrage hängen nicht zuletzt von der Bereitschaft ab, gewohnte Verhaltensmuster zu durchbrechen und teilweise Einschränkungen der (wahrgenommenen) Entscheidungsautonomie hinzunehmen (vgl. auch oben „Digitalisierung“). Ein grundsätzliches Verständnis für die Bedeutung und Notwendigkeit der jeweiligen Maßnahmen ist dafür, neben einer angemessenen finanziellen Kompensation, eine essentielle Voraussetzung. Dies kann jedoch angesichts der teils erheblichen Informationsdefizite im Energiebereich eine besondere Herausforderung darstellen.
- Regulatorische Maßnahmen bzw. die regulatorischen Rahmenbedingungen setzen Anreize für Investitionen und mögliche Verhaltensänderungen und schaffen die Grundlage für die Überführung innovativer Technologien und Dienstleistungen in tragfähige Geschäftsmodelle. Die bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen und Maßnahmen sollten kritisch evaluiert werden, ob sie die Marktverbreitung systemdienlicher Innovationen und Dienstleistungen über entsprechende Geschäftsmodelle zulassen.
- Mit Blick auf die Ausgestaltung regulatorischer Rahmenbedingungen ist ferner zu beachten, dass die zuvor angesprochenen verbraucherseitigen Besonderheiten die Wirksamkeit wirtschaftlicher Anreize und Preissignale am Energiemarkt einschränken können. Vor diesem Hintergrund können spezielle regulatorische Maßnahmen erforderlich werden, die etwa auf den Abbau von Informationsdefiziten, auf verhaltensökonomische Besonderheiten oder sonstige Hemmnisse von Verhaltensänderungen oder (Markt-)Akzeptanz gerichtet sind. Die Wirkung derartiger Maßnahmen ist bislang allerdings nur eingeschränkt verstanden, so dass mit Blick auf Ausgestaltung derartiger Maßnahmen erheblicher weiterer Forschungsbedarf besteht. Auch Aspekte wie drohende Rebound-Effekte oder die Heterogenität der Anwender bzw. Verbraucher sind dabei zu betrachten.
- Weitere sozio-ökonomische und auch psychologische Forschung mit dem Ziel, das Verständnis der nicht-technischen Umsetzungshemmnisse und des Zusammenwirken von Verbraucherverhalten, Technologien und regulatorischer Maßnahmen zu verbessern, erscheint generell, d.h. etwa auch mit Blick auf das Mobilitätsverhalten, erforderlich. Eine Förderung ist auch deshalb angezeigt, da existierende internationale Studien aufgrund kultureller Unterschiede und sonstiger regionaler Besonderheiten nur beschränkt Aufschluss über das Verbrauchsverhalten in

Deutschland geben können. Mit Blick auf das Energienachfrageverhalten gilt es zudem, Gründe des Marktversagens wie Informationsdefizite und -asymmetrien von verhaltensökonomischen Besonderheiten genauer abzugrenzen. Hierzu erscheinen auch Förderung und Aufbau geeigneter Datengrundlagen für entsprechende Analysen sinnvoll.

### 3.9 Querschnittsthema: Regulatorische Herausforderungen

*Im liberalisierten Energiemarkt kommt Preissignalen zur Koordination der unterschiedlichen Marktteilnehmer und Schaffung von Investitionsanreizen zentrale Bedeutung zu. Es ist zu klären,*

- a. inwieweit die regulatorischen Rahmenbedingungen im Energiemarkt weiterentwickelt werden müssen, um die Voraussetzungen für eine effiziente marktliche Steuerung durch Preissignale zu schaffen und*
- b. inwieweit Preissignale allein langfristig die Dekarbonisierung des Energiesystems in effizienter Weise und unter Wahrung der Versorgungssicherheit ermöglichen können.*

*Zu beachten sind dabei insbesondere auch Verteilungswirkungen und die Integration und Verflechtung des deutschen Energiemarkts mit dem europäischen Ausland.*

- Die regulatorischen Rahmenbedingungen müssen (privat-)wirtschaftliche Anreize so setzen, dass den im Zuge der Energiewende veränderten Voraussetzungen für Versorgungssicherheit und Systemstabilität und möglichen neuen Zielkonflikten in der Abwägung der Dimensionen des energiepolitischen Zieldreiecks Rechnung getragen wird und so aus Systemsicht auch langfristig möglichst kosteneffiziente Lösungen zur Umsetzung der Dekarbonisierungsziele gefunden werden.
- Herausforderungen und Forschungsbedarf bestehen grundsätzlich in zweifacher Hinsicht: Zu fragen ist einerseits, ob die Preissignale im heutigen Energiemarkt die Kosten und Nutzen verschiedener Dekarbonisierungsalternativen vollumfänglich umfassen. Angesichts langfristiger Zeithorizonte, teils starker Pfadabhängigkeiten, hohen Kapitalbedarfs, hoher Unsicherheit und besonderen Anforderungen von Versorgungssicherheit ist andererseits zu prüfen, inwieweit bei der Energiewende allein auf Preissignale und das freie Spiel der Marktkräfte vertraut werden kann und nicht weitergehende regulatorische Eingriffe erforderlich sind.
- Die Förderung Erneuerbarer Energien sollte mit dem Ziel einer zunehmenden Marktintegration weiterentwickelt werden. Doch auch wenn Betreiber und Investoren stärker den Marktpreisen und -risiken ausgesetzt werden, lassen die Preissignale vom Energiemarkt heute einen längerfristig, aus Systemkosten-Sicht effizien-

ten Ausbau der Erneuerbaren Energien nicht erwarten. Zu unklar erscheint zumindest mittelfristig die Frage der kosteneffizienten Risikoverteilung im Gesamtsystem angesichts technologischer Unsicherheit, einer unsicheren weiteren europäischen Integration der Energiemärkte sowie bestehender Pfadabhängigkeiten. Physische Engpässe und Kosten des Aus- und Umbaus der Netzinfrastruktur sowie das Zusammenspiel zwischen Erneuerbaren Energien und den verschiedenen sonstigen Flexibilitätsoptionen zur Wahrung der Versorgungssicherheit gehen zudem bislang nur sehr eingeschränkt in die heutigen Preissignale ein.

- Forschungsbedarf besteht bei der Gestaltung des zukünftigen wettbewerblich organisierten Energiemarkts nicht nur mit Blick auf die geeignete Marktintegration der Erneuerbaren Energien und perspektivisch auf ihre Finanzierung im Energiemarkt. Zu prüfen sind auch die Finanzierungsmöglichkeiten und die Abstimmung sowohl von Maßnahmen zur Flexibilisierung der Energienachfrage als auch von Optionen zur Bereitstellung von Flexibilität und Sicherung der Versorgungssicherheit über Energiespeicher und Back-up-Erzeugungskapazitäten. Dabei ist auch zu beachten, dass sich im Zuge der Digitalisierung völlig neue Möglichkeiten zur dezentralen und auch wesentlich kurzfristigeren Koordination mit Hilfe von Preissignalen ergeben können.
- Das derzeitige System von Entgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen steht heute vielfach einer weitergehenden Sektorkopplung entgegen. Eine Weiterentwicklung dieses Systems der Energiebepreisung erscheint in diesem Zusammenhang als wichtige regulatorische Herausforderung und Forschungsaufgabe, um eine Verbesserung der Anreizstrukturen zu erreichen. Zu untersuchen sind insbesondere die Möglichkeiten zur schrittweisen Vereinheitlichung der CO<sub>2</sub>-Kosten an den Sektorgrenzen unter Beachtung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und Verflechtung der Energiemärkte sowie verteilungspolitischer Implikationen.

### 3.10 Querschnittsthema: Flexibilitätsoptionen und Sektorkopplung

*Flexibilitätsoptionen sind heute deutlich umfassender zu denken als noch zum Zeitpunkt der Erstellung des 6. Energieforschungsprogramms. Sie stellen einen essentiellen technischen Baustein für das Gelingen der Energiewende dar. Des Weiteren sollte beachtet werden, dass auch marktliche Anpassungen einen Beitrag zur Hebung von Flexibilitätsoptionen leisten und zu einer Änderung des Bedarfs an Flexibilität führen können. Dabei beschränken sich Flexibilitätsoptionen nicht nur auf den Umwandlungssektor, sondern sind ein wichtiges Bindeglied zur Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Flexibilitätsoptionen umfassen somit flexible Erzeuger, Verbraucher, Speicher und Netze. Insbesondere letztere sind für das zukünftige Energiesystem von besonderer Bedeutung.*

*So ist es wichtig zu erforschen, wie neue und bestehende Technologien die Leistungsfähigkeit, Stabilität und Flexibilität von Stromnetzen steigern können, um den Netzausbaubedarf zu verringern sowie den Netzbetrieb zu optimieren.*

- Flexibilitätsoptionen müssen ganzheitlich betrachtet und bewertet werden. Hierunter fallen neben technischen Aspekten auch Themen wie Akzeptanz. Darüber hinaus ist es wichtig Flexibilitätsoptionen so weiter zu entwickeln, dass diese effizienter, kostengünstiger und ressourcenschonender werden.
- Es müssen neue Ansätze in der Bewertung und zu einer systemdienlichen Marktintegration von Flexibilitätsoptionen gefunden und dabei weltweite Entwicklungen berücksichtigt werden.
- Forschungsbedarf hinsichtlich der Netze stellt die Steigerung der Leistungsfähigkeit, Stabilität und Flexibilität von Stromnetzen dar, um den Netzausbaubedarf zu verringern sowie den Netzbetrieb zu optimieren.

### **3.11 Querschnittsthema: Energiesystemanalyse**

*Die Energiesystemanalyse stellt ein wichtiges methodisches Instrument dar, um Maßnahmen und Wirkmechanismen bei der Transformation des Energiesystems im internationalen Umfeld zu untersuchen. Bislang liegt der Fokus der Systemanalyse meist auf dem energiepolitischen Zieldreieck und berücksichtigt noch zu wenig das Verhalten der unterschiedlichen Akteure. Zukünftig sollte die Systemanalyse umfassender gedacht werden und durch eine Erweiterung der Bewertungskriterien ganzheitlicher erfolgen. Das bedeutet, dass neben einer umfassenden Abbildung der technischen Aspekte auch gesellschaftspolitische Themen wie Akzeptanz adressiert und integrierte Betrachtungen ergänzt durch Lebenszyklusanalysen erfolgen sollten.*

- Die Energiesystemanalyse muss an die neuen Herausforderungen insbesondere im Kontext der steigenden Anzahl an Bewertungskriterien angepasst und weiterentwickelt werden.
- Die Energiesystemanalyse bewegt sich meist innerhalb eines engen Szenariotrichters, wohingegen die Vergangenheit immer wieder gezeigt hat, dass es disruptive Ereignisse geben kann, welche zu signifikant anderen Lösungen führen können. Daher sollte auf eine Öffnung des Szenariotrichters geachtet werden, indem relevante Stellschrauben und Analysen der mit disruptiven Ereignissen einhergehenden Auswirkungen identifiziert werden.
- Von besonderer Bedeutung ist die Validierung von Energiesystemmodellen. Um dies zu erreichen ist es einerseits essentiell, verwendete Daten und Modelle zu veröffentlichen. Darüber hinaus ist eine breite und tiefe zentrale Datenbasis not-

wendig. Kleine Forschungseinrichtungen können häufig nicht den Aufwand erbringen, eine solche Datenbasis zu erarbeiten und zu pflegen. Daher sollte weiter in die Bereitstellung öffentlich verfügbarer Datenquellen investiert werden.

- Die Ergänzung der Energiesystemanalyse um Lebenszyklusanalysen stellt ein wichtiges Forschungsfeld dar, um auch Aussagen zu den langfristigen Umweltwirkungen von relevanten Zukunftstechnologien treffen zu können.

## 4 Förderformate

Im Rahmen der Weiterentwicklung des Energieforschungsprogramms sind nicht nur die förderfähigen inhaltlichen Fragestellungen, sondern auch die Formate und Ausgestaltung der Forschungsförderung zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Unter den Begriff des Förderformats fällt dabei nach dem Verständnis dieser Studie ein breites Spektrum von Gesichtspunkten, die für den Erfolg des Forschungsprogramms von hoher Bedeutung sind, gerade auch mit Blick auf die Heranführung innovativer Technologien und Lösungen an die Marktreife und die Schaffung entsprechender Rahmenbedingungen. Diese Gesichtspunkte reichen von der konzeptionellen Gestaltung des Forschungsprogramms über die Art und Zusammensetzung der geförderten Projekte bis hin zur administrativen Organisation und Koordination der Förderung. Bedarf zur Weiterentwicklung der Formate kann sich zum einen aus Erfahrungen mit der bisherigen Forschungsförderung über das 6. Energieforschungsprogramm ergeben, wie sie auch in der Online-Umfrage im Rahmen des Leitprojekts abgefragt wurden. Zum anderen kann dieser Bedarf aus der Veränderung der relevanten Forschungsthemen folgen, wenn etwa die Gefahr besteht, dass bestehende inhaltliche oder disziplinäre Abgrenzungen der Bewältigung neuer Herausforderungen im Energiesystem nicht mehr gerecht werden.

Eine umfassende Evaluation der Ausgestaltung der Forschungsförderung im 6. Energieforschungsprogramm geht über den Rahmen dieser Studie hinaus. Die Darstellung im Folgenden beschränkt sich daher, auch hinsichtlich der Berücksichtigung der Ergebnisse der Online-Umfrage, auf einzelne, aber zentrale Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung der Förderformate des 6. Energieforschungsprogramms. Konzeption und Koordination der Förderung werden im Hinblick auf die identifizierten inhaltlichen Forschungsbedarfe und Herausforderungen der weiteren Dekarbonisierung im Zusammenhang mit der Forderung nach einer umfassend integrativen Energieforschung aufgegriffen. Speziell mit Blick auf die Förderbedingungen von Start-ups wird die erhoffte und notwendige schnelle Verbreitung innovativer und kreativer Lösungsansätze zur Dekarbonisierung des Energiesystems ausführlicher betrachtet. Mit Großverbundprojekten und Reallaboren werden schließlich zwei spezielle Formen von Forschungsprojekten näher beleuchtet, die aktuell intensiv diskutiert werden. Im Ergebnis lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen.

*Die Bewältigung der vielfältigen Herausforderungen der Energiewende erfordert eine konzeptionelle Weiterentwicklung der Energieforschungsförderung in Deutschland, bei der neu und über bestehende Systematisierungen hinweg gedacht wird.*

*a. Wirtschaft-, Sozial- und Rechtswissenschaften müssen umfassend in die Energieforschung integriert und verstärkt in systemischen Fragestellungen über Sektorgrenzen*

*hinweg adressiert werden. In diesem Zusammenhang erscheint auch eine Ressort-übergreifende Ausgestaltung und Koordination der Forschungsförderung sinnvoll, die zugleich der Transparenz der Förderlandschaft zugutekommt.*

- b. Die bekannten unterschiedlichen Formate der Energieforschungsförderung haben jeweils unterschiedliche Schwerpunkte. So sind zur Erreichung wichtiger übergreifender Ziele langfristig angelegte Großverbundprojekte ein adäquates Mittel, während innovative Ansätze oft schneller über Einzelprojekte gefördert werden. Zur Berücksichtigung der besonderen Anforderungen von Startups und kleinen Unternehmen verbunden mit einer stärkeren Verankerung einer Gründerkultur in Deutschland scheinen auch neue bzw. angepasste Projektformate und -förderverfahren angezeigt. Eine Flexibilisierung der Forschungsförderung über beschleunigte Antrags- und Genehmigungsverfahren oder leichtere Möglichkeiten der Kombination von anwendungsorientierter und Grundlagen-Forschung und der Anpassung von Projektzielen erscheint dabei nicht nur zur Förderung junger Unternehmen sinnvoll.*
- c. Reallabore können in der Energieforschung einen wichtigen Mehrwert bieten, um F&E-Ergebnisse durch die Interaktion mit dem Nutzer in realer Umgebung schneller in erfolgreiche Produkte und Services zu überführen.*

## **4.1 Integrative Energieforschung**

Die Dekarbonisierung des Energiesystems stellt ohne Zweifel eine große technische Herausforderung dar. Dennoch vollzieht sich der Umbau des Versorgungssystems nicht in einem abgeschlossenen, rein technischen System, sondern wirkt ein auf Gesellschaft, Wirtschaft und Lebensbedingungen der Menschen, wird zugleich aber auch selbst von diesen Faktoren und Rahmenbedingungen beeinflusst. Zwar zeigt das bestehende Technologieportfolio, dass die Technologieforschung bereits einen signifikanten Beitrag zur technischen Erreichbarkeit der vorhandenen Energie- und Klimaziele geleistet hat. Jenseits dessen treten jedoch zunehmend weitergehende und nicht-technische Herausforderungen zutage.

Derartige Herausforderungen liegen in der zügigen Marktverbreitung innovativer Technologien und Lösungen, die von einem entsprechenden Marktumfeld und hoher Marktakzeptanz getragen sein muss. Daneben gewinnen Querschnitts- bzw. sektorübergreifende Themen generell mit Fortschreiten der Energiewende erheblich an Bedeutung und können erhebliche Implikationen für die Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems haben. Dies gilt insbesondere für die Digitalisierung und die zunehmende Vernetzung bzw. Kopplung von Anwendungssektoren (Strom, Wärme, Mobilität), die eine effizientere Nutzung der weiterhin steigenden Erzeugungsmengen der Erneuerbaren Energien unter Wahrung der Anforderungen von Versorgungssicherheit verspricht.

Vor diesem Hintergrund ist ein neues Denken über bestehende Sektor- und Systemgrenzen, über die Grenzen von Grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung sowie über die Grenzen verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen hinweg erforderlich. Eine umfassend „integrative“ Energieforschung trägt diesen Anforderungen Rechnung und ermöglicht es zugleich, „Flaschenhälse“ der Energiewende effektiver und frühzeitiger zu identifizieren. Die bestehenden Ressort-übergreifenden Förderinitiativen des 6. Energieforschungsprogramms zu Energiespeichern, Energienetzen und klimafreundlichen Städten sollten als Leitbild bei dessen Neukonzeption aufgegriffen werden und das Programm insgesamt Ressort-übergreifend, nach inhaltlichen Förderschwerpunkten strukturiert und koordiniert werden (vgl. auch [13]). In diesem Zuge kann etwa auch die strikte Trennung zwischen Ressort-spezifischer Verantwortung von anwendungsorientierter (insbesondere BMWi) und Grundlagen-Forschung (BMBF) entfallen. Es wird zunehmend deutlich, dass eine solche trennscharfe Unterscheidung verschiedener Stufen des Innovationsprozesses und von grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung der hohen Komplexität und Dynamik des Umbaus des Energiesystems (Versorgungssysteme und Anwendungssektoren) immer weniger gerecht wird und dem Auffinden und der Verbreitung der geforderten innovativen und kreativen Lösungen mehr und mehr im Wege steht (vgl. auch [14]). Verbunden mit dieser themenbezogenen Ausgestaltung des Forschungsprogramms sollten schließlich wirtschafts-, sozial- und rechtswissenschaftliche Analysen nicht länger schwerpunktmäßig nur im Rahmen der Begleitforschung Berücksichtigung finden. Vielmehr erscheint für die Identifikation von „Flaschenhälse“ bei der Dekarbonisierung und der zügigen Verbreitung der benötigten innovativen Lösungen und zur Schaffung entsprechender Rahmenbedingungen eine umfassende Integration dieser nicht-technischen Disziplinen und Themen in die Energieforschung und Technologieentwicklung angezeigt (vgl. auch [15] und [16]).

Analysen des Energie- und Technologienachfrageverhaltens sowie der regulatorischen Rahmenbedingungen können Erkenntnisse über zentrale Faktoren und Treiber des Marktumfelds liefern und etwa auf regulatorischer Ebene auch energiepolitischen Handlungsbedarf frühzeitig offenlegen. In diesem Zusammenhang ist auch die Förderung der „Markthochlaufphase“ neuer, innovativer Technologien und Dienstleistungen beispielsweise über die Förderung von Demonstrations- und Modellprojekten sowie Reallaboren relevant, insbesondere wenn in diesen Experimentierräumen Disziplin-übergreifend neue Konzepte und Technologien ausgetestet werden können. Ein derart Disziplin-übergreifender Ansatz kann darüber hinaus das Bewusstsein für die Anforderungen und möglichen Hürden bei der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, auch auf Basis innovativer Technologien und Dienstleistungen, stärken (vgl. auch das folgende Kapitel 4.2 zu Start-Ups). Ferner dient die thematische, Ressort-übergreifende Ausgestaltung des Forschungsprogramms auch der Transparenz der Fördermöglichkeiten und laufenden Fördervorhaben

und verspricht so auch dem Gedanken des Austausch zwischen verschiedenen geförderten Vorhaben, über die bestehenden Forschungsnetzwerke und Energiewende-Plattformen hinaus, besser gerecht zu werden.

## 4.2 Start-Up-Förderung

Die Struktur und Geschäftskonzepte der Energiewirtschaft befinden sich getrieben durch die politisch gesetzten Ziele zu Dekarbonisierung und Erneuerbaren Energien und die Digitalisierung im Umbruch. Nicht zuletzt die Digitalisierung senkt dabei die Markteintrittsbarrieren in den Energiemarkt erheblich und bietet so grundsätzlich auch kleinen und neuen bzw. branchenfremden Unternehmen Möglichkeiten, erfolgreiche neue Produkte und Dienstleistungen innerhalb des Energiesystems zu entwickeln und zu vermarkten. Kreative, branchenübergreifende Lösungen gelten gleichzeitig als wichtige Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende und für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit angesichts des Ausbaus fluktuierender Erneuerbarer Energien, zunehmender Dezentralisierung, zunehmender Akteursvielfalt und zunehmender Kopplung von Sektoren durch Elektrifizierung und alternative (strombasierte) Kraftstoffe. Der Förderung neuer Geschäftsmodelle und junger Unternehmen mit kreativen Produktansätzen wird daher auch mit Blick auf die Stärkung des Wirtschaftsstandorts Deutschland hohe Bedeutung beigemessen.

Getrieben durch den Boom bei den Erneuerbaren Energien weist die Energie- und Wasserwirtschaft eine im Branchenvergleich hohe Rate an Unternehmensgründungen auf [21]. Dennoch werden Hürden für die Gründung von Unternehmen im energiewirtschaftlichen Bereich beklagt und von verschiedener Seite, wie auch in der Online-Umfrage [7], eine stärkere Berücksichtigung der Besonderheiten neu gegründeter, kleiner Unternehmen bei der Ausgestaltung der Fördermöglichkeiten im Rahmen des Energieforschungsprogramms gefordert.

Als problematisch werden dabei in der bisherigen Ausgestaltung der Förderung der administrative Aufwand der Antrags- und Berichtserstellung und die langen Vorlauf- bzw. Bewilligungszeiten bis zur endgültigen Mittelzusage gesehen. In jungen, neu gegründeten Unternehmen fehlen vielfach ausreichend Mitarbeiter mit entsprechender administrativer Erfahrung und die nötigen finanziellen Mittel, um die Zeit bis zur Förderzusage zu überbrücken. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang auch, dass fehlende staatliche Förderzusagen zugleich oft das Einwerben finanzieller Mittel von privaten Investoren erschweren. Eine besondere Hürde für junge bzw. neu gegründete Unternehmen in der derzeitigen Ausgestaltung der Förderbedingungen des Energieforschungsprogramms stellt darüber hinaus die geforderte Bonitätsprüfung dar. Vielfach liegen noch keine zwei Jahresabschlüsse vor, so dass Liquiditätsbürgschaften notwendig werden, die die ohne-

hin bestehenden Finanzierungsprobleme von Unternehmen in der Gründungsphase zusätzlich verschärfen. Kritisiert werden auch die für junge Unternehmen zu geringen Förderquoten und zu hohen Eigenanteile und die zum Teil unrealistisch hohen Erwartungen an die Sicherheit des Projekterfolgs (vgl. zu den spezifischen Problemen von jungen Unternehmen auch [22] oder [23]).

Eine Abmilderung dieser komplexen und zum Teil wechselseitig abhängigen Finanzierungsprobleme könnte darin bestehen, vorläufige Förderzusagen auszusprechen, die einerseits an Zusagen privater Investoren geknüpft werden, diese andererseits aber auch erleichtern. Anzudenken wäre darüber hinaus, für Unternehmensgründungen, die auf die Heranführung innovativer Technologien und Dienstleistungen aus der Forschung an den Markt abzielen, beschleunigte Antragsverfahren einzurichten. Kreative, aber mit noch relativ hoher Unsicherheit behaftete Geschäftsmodelle junger Unternehmen könnten zudem auch über ein begrenztes Förderbudget für „Innovationsprojekte“ gefördert werden, bei denen den geförderten Projekten größere Freiräume in der Projektbearbeitung und höhere Erfolgsunsicherheit zugestanden werden.

Wachsende Bedeutung für neue Geschäftsmodelle und erfolgreiche Produkte und Dienstleistungen wird im Zuge der Digitalisierung schließlich auch der Verfügbarkeit von bzw. dem Zugang zu Daten zukommen. Daraus ergeben sich gerade für junge Unternehmen jedoch zunehmend Markteintrittsbarrieren und Wettbewerbsnachteile gegenüber etablierten Unternehmen, die während ihrer Geschäftstätigkeit in der Lage sind, selbst entsprechende Datensätze aufzubauen. Ein weiterer Ansatz zur Förderung von Unternehmensgründungen im Energiebereich könnte daher darin bestehen, den Aufbau entsprechender Datensätze oder die Sicherung des Zugangs zu entsprechenden Daten, z.B. durch eine staatliche Stelle oder die Netzbetreiber, im Rahmen des Energieforschungsprogramms zu fördern und sicherzustellen.

Die mangelnde Umsetzung von Forschungsergebnissen in erfolgreiche Unternehmensgründungen ist generell auf eine oft nur beschränkte Berücksichtigung der unternehmerischen Perspektive in jeder Stufe des Forschungsprozesses zurückzuführen. In diesem Zusammenhang kann auch in der geforderten, noch stärker Disziplin-übergreifenden „integrativen“ Ausgestaltung der Energieforschungsförderung (vgl. Kapitel 4.1 „Integrative Energieforschung“), die parallel zur Technologieentwicklung die Analyse der breiteren sozioökonomischen Voraussetzungen einer erfolgreichen Anwendung von Technologien und komplementären Dienstleistungen zum Ziel hat, ein Ansatz liegen, die Chancen für erfolgreiche marktnahe Entwicklungen und somit Unternehmensgründungen zu erhöhen (vgl. z.B. auch „Inkubator-Programm XPRENEURS“ der Unternehmer TUM, [24]). Zugleich würde über eine derartige Ressort-übergreifende, rein thematisch gegliederte Ausgestaltung der Energieforschungsförderung die Transparenz der Fördermöglichkeiten erhöht werden. Eine wichtige Rolle können zudem regionale Innovations-Cluster spielen.

Diese sollten auf ein Zusammenspiel von kooperierenden Unternehmen und Konzernen, Bildungsprogrammen zur Unternehmensgründung, MINT Ausbildung an Universitäten und Forschungseinrichtungen, Seed-Finanzierungen und Förderprogrammen für regionale Innovationsinitiativen und Konsortialprojekte zwischen Start-Ups, Forschungseinrichtungen und KMUs in clusternahen Themenbereichen abzielen. Grundlegend notwendig sind in diesem Zusammenhang der Ausbau interdisziplinärer Studienangebote sowie innovationsorientiertere Hochschulen. Zu prüfen wäre etwa auch, ob mit Hilfe staatlicher Förderung weitere Gründerzentren in Anlehnung an das Konzept der UnternehmerTUM [25] geschaffen werden könnten, die neu-gegründeten Unternehmen Freiräume zur Entwicklung tragfähiger Geschäftsmodelle bieten könnten, etwa durch Bereitstellung von Experimentierräumen oder administrative Unterstützung.

Generell zeigt die Erfahrung jedoch, dass das Imitieren erfolgreicher Institutionen und Prozesse, wie sie z.B. im nordamerikanischen Raum zu finden sind, im deutschen Kontext nicht notwendigerweise zu den gewünschten Erfolgen im Bereich der Unternehmensgründungen führen. Vielmehr können diese Institutionen ihre Potentiale nur entfalten, wenn sie auch auf ein entsprechendes soziales und kulturelles Umfeld treffen, in dem Versagen und Scheitern als natürlicher Teil von Gründungsaktivitäten wahrgenommen werden. Die Forschungsförderung kann einen derartigen Gründergeist nicht direkt etablieren, den notwendigen, womöglich langwierigen, kulturellen Wandel jedoch über die genannten Möglichkeiten zur Verringerung der Distanz zwischen Forschung und unternehmerischer Perspektive und speziellen Bildungsangeboten anstoßen und vorantreiben.<sup>1</sup>

### 4.3 (Groß-)Verbundprojekte

Mit der Energiewende sind, wie bereits dargestellt, nicht nur einzelwirtschaftliche und technologische Herausforderungen verbunden; die Energiewende muss auch in ihrer Gesamtheit sektorübergreifend und im Zusammenspiel von Gesellschaft, Wirtschaft und Technologie betrachtet werden. Dies bringt eine Reihe von systemischen Herausforderungen mit sich, die nicht von einzelnen Institutionen oder kleineren Verbundprojekten analysiert werden können. Aus diesem Grunde spielen Großverbundprojekte im Rahmen der Energieforschung eine zunehmend bedeutendere Rolle.

Unter Großverbundprojekten werden dabei Projekte verstanden, in denen große Konsortien aus Wissenschaft und Wirtschaft arbeitsteilig zusammenwirken, um im Rahmen strategischer Zielsetzungen neues Wissen, neue Technologien, Produkte, Demonstrationsprojekte oder gemeinsame Ressourcen für die Forschung zu entwickeln [17], [19]. Die

---

<sup>1</sup> Eine weiterführende und allgemeinere Diskussion der Voraussetzungen und Fördermöglichkeiten der Entstehung neuer innovativer Geschäftsmodelle findet sich im separaten Sektorsteckbrief „Sektorübergreifende Themen“.

Partner in Verbundprojekten können KMU, Industrie, Hochschulen oder Forschungseinrichtungen sein [18]. Die einzelnen Teilprojekte der beteiligten Akteure müssen aufeinander abgestimmt sein. Deshalb folgt die Ausrichtung der Teilprojekte im Allgemeinen einer Hauptrichtung, wodurch innovative Ideen häufig nicht zum Zuge kommen. Für diese sind Einzelprojekte das passendere Förderformat. Aktuelle Beispiele für (Groß-)Verbundprojekte sind z.B. die Kopernikus-Projekte für die Energiewende, Schaufenster-Projekte wie SINTEG: "Schaufenster intelligente Energie - Digitale Agenda für die Energiewende", „AG Turbo“ als Plattform der Turbomaschinenforschung oder große Verbundprojekte im Rahmen von EU Horizon 2020. Großverbundprojekte können aber auch Begleitforschungsprojekte (z.B. STROMbegleitung: „Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität“), Demonstrationsprojekte (z.B. InnovFin: „Demonstrationsprojekte im Energiesektor“) oder vorwettbewerbliche Forschungsprojekte (z.B. CORNET: „Collective Research Networking“) sein. Auch Reallabore (z.B. Smart Energy Living Lab Project) können Großverbundprojekten zuzuordnen sein (siehe auch Abschnitt 3.4).

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführte Online-Umfrage [7] ergab für Großverbundprojekte, dass der Aufwand für Koordination, Abstimmung vor Projektbeginn, Kooperationsvereinbarungen und gemeinsame Beantragung von den Umfrageteilnehmern als hoch eingestuft wurde. Zudem wurden die Akquise geeigneter Industriepartner, die Harmonisierung teilweise divergierender Einzelinteressen (zum Beispiel Regelungen zum Umgang mit geistigem Eigentum) und die Fortführung des Vorhabens beim Wegfall von Partnern als potentiell kritische Herausforderungen genannt. Experten, die Erfahrung mit Großverbundprojekten haben, schätzen den Nutzen im Verhältnis zum Aufwand von Großverbundforschungsvorhaben geringer ein als den von Einzelforschungsprojekten.

Großverbundprojekte haben gemäß ihren strategischen Zielsetzungen in der Regel eine längere Laufzeit als Einzelprojekte. Die beteiligten Forschungspartner haben dadurch eine gewisse Planungssicherheit. Das bedeutet aber auch, dass groß aufgestellte, kollektive Förderformate einerseits einen mittel- bis langfristig angelegten, möglichst nachhaltigen Finanzierungshorizont benötigen, um ihr Potential voll entfalten zu können, andererseits sollten auf lange Sicht ausgearbeitete Exit-Strategien sowohl von den öffentlichen Forschungsförderern als auch von den wissenschaftlichen Einrichtungen frühzeitig mitgedacht werden [20].

Für die Beratung und Überwachung von Verbundprojekten wird in der Regel ein Beirat oder Lenkungsausschuss eingesetzt, der aus Vertretern von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zusammengesetzt ist. Hier ist es wichtig, dass die Zusammensetzung ausgewogen ist und nicht einseitig von einer Interessensgruppe dominiert wird.

## 4.4 Reallabore - neue Konzepte für die Energieforschung

Der Primärenergieverbrauch bis 2050 soll insgesamt um 50%, im Gebäudebereich sogar um 80% reduziert werden. Dies setzt den intensiven Einsatz von Erneuerbaren Energien und eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz voraus. Bestehende Einsparmöglichkeiten sind bei weitem noch nicht ausgeschöpft, die Gründe hierfür sind ganz wesentlich im Nutzerverhalten zu suchen: es fehlen wirtschaftliche, gesellschaftliche und persönliche Anreize in der Umsetzung bekannter Maßnahmen (zu geringe Kosteneinsparung, wenig Imagegewinn, Komfortverzicht etc.). Um die nutzerseitigen Potentiale und die Hemmnisse systematisch zu analysieren, kommen in letzter Zeit verstärkt „Reallabore“ oder „Living Labs“ zum Einsatz. Beide Begriffe werden hier synonym verwendet, auch wenn sich in der Literatur gewisse, aber nicht immer eindeutige Unterschiede finden. Mit Reallaboren wird das Anwenderverhalten in einer Laborumgebung untersucht, um daraus Schlüsse für zukünftige technische, ökonomische oder persönliche Anreize zur Energieeinsparung abzuleiten.

Reallabore entwickelten sich über die Jahre zu einer nutzerzentrierten Methode, bei der exploratives Forschen gemeinsam mit dem Nutzer innovative Lösungen generieren soll. Hierbei soll das Forschungskonsortium nachhaltig und in der realweltlichen Umgebung des Nutzers arbeiten und möglichst Nutzwert und monetären Wert schaffen.

Reallabore werden international in verschiedenen Formen und Größen bereits für viele verschiedene Forschungsfragen angewendet. Bei der Modellierung von Energiesystemen eignen sie sich für die Lösung nutzerzentrierter Problemstellungen. Das Berücksichtigen der Nutzerbedürfnisse im F&E-Prozess ist dabei der essentielle Vorteil gegenüber anderen Methoden, denn es führt zu höherer Akzeptanz und zu wahrscheinlicherem Markterfolg der Produkte und Services.

Folgende Kriterien sind für ein Reallabor essentiell:

Offenheit: Je offener ein Reallabor gestaltet ist, desto mehr Perspektiven, Wissen und Informationen können in den Prozess einfließen.

Realitätsbezug: Reallabore müssen möglichst realitätsgetreu sein, um wirkliche Erfahrungen der Nutzer erforschen zu können. Daher sollen Nutzer in ihrer natürlichen Umgebung (z.B. zu Hause) in den Forschungsprozess eingebunden werden, um künstlich geschaffene Situationen beispielsweise in Forschungslaboren auszuschließen.

Beeinflussung: Die Ergebnisse eines Reallabors Projektes hängen von der Kreativität und der aktiven Teilnahme seiner Nutzer ab. Daher ist es unabdingbar, den Nutzer dazu zu animieren aktiv im Projekt teilzunehmen und seine Wünsche preiszugeben.

Spontanität: Das Erfahren der Wünsche und Bedürfnisse von Nutzern kann sich im Projekt als Herausforderung herausstellen. Daher ist Spontanität ein wichtiges Kriterium, um

neue Bedürfnisse schnell zu erkennen, ein Reallabor Projekt soll daher anpassungsfähig sein.

Nachhaltigkeit: Nachhaltigkeit ist ein weiteres Grundprinzip für Reallabore. Reallabore haben als Innovationsplattformen die Pflicht, auch im gesellschaftlichen Kontext Verantwortung zu zeigen. Erlangte Kenntnisse sollen offengelegt werden, im Sinne eines kontinuierlichen Lernprozesses über die Grenzen des Reallabors hinaus.

Value Creation: Reallabore müssen Mehrwerte schaffen (z.B. im Sinne von „business value creation“ und „user value creation“). Ein Reallabor ist dann erfolgreich, wenn es für die Nutzer der entstandenen Innovation einen Mehrwert bietet und, im Falle marktlicher Prozesse, mit wirtschaftlichem Erfolg verbunden ist.

Reallabore bzw. Living Labs können im Rahmen zukünftiger Energieforschung in Verbindung mit weiteren Forschungsformaten wie Programmen und Verbundvorhaben folgenden Mehrwert bieten:

- Systematische Messungen/Beobachtungen an der Schnittstelle von Mensch und Technik,
- kontinuierliches Feedback unterschiedlicher Nutzer an die Entwickler,
- flexibel einsetzbar, für unterschiedlichste Technologien und Dienstleistungen,
- beliebig skalierbare Größe (Haus, Quartier, Stadt),
- interdisziplinärer Ansatz, der viele Akteure schon in frühen Produktstadien integrieren kann,
- Erhöhung der Marktchancen durch frühzeitige Akzeptanzanalyse und -verbesserung.

Die Inhalte dieses Abschnitts sind angelehnt an [26].

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Konsultationsprozesses für das 7. Energieforschungsprogramm war das Ziel des strategischen Leitprojekts EnFo-2030 die wesentlichen Herausforderungen und Eckpunkte für die zukünftige Energieforschung bzw. Forschungsförderung mittels einer Top-Down-Analyse zu identifizieren und zu beschreiben. Dazu wurden 12 Thesen formuliert als Synthese der Inhalte aus den sektorspezifischen Steckbriefen für Umwandlungssektor, Industrie, Haushalte, Verkehr und GHD sowie einem sektorübergreifenden Steckbrief zu verschiedenen Querschnittsthemen. Letzterer umfasst Fragestellungen rund um Geschäftsmodelle, Digitalisierung, Akzeptanz, Nachfrageverhalten und regulatorischen Rahmen sowie Herausforderungen bei Betrachtung des Energiesystems und der Energiesystemanalyse.

Der Fokus der Thesen liegt auf der technologieoffenen Energieforschung für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende in Deutschland als Teil des europäischen Energieverbundes. Die Thesen adressieren einerseits je drei Schwerpunkte der Energiebereitstellung und Energieanwendung bei der Dekarbonisierung des Energiesystems. Andererseits werden fünf zentrale Querschnittsthemen aufgegriffen sowie Empfehlungen zur Fortentwicklung der Förderformate zusammengefasst. Die Inhalte der Thesen sind dabei themenbezogen so strukturiert, dass sie mögliche Programmthemen für das 7. Energieforschungsprogramm darstellen könnten.

Der Mehrwert des entwickelten Verfahrens liegt neben der systematischen Identifikation des Forschungsbedarfs nach Sektoren und Kriterien auch im Perspektivwechsel, der in den Maßnahmensteckbriefen vollzogen wurde. Hier erfolgte im Gegensatz zur sektoralen Sichtweise eine Clusterung nach Themen hinsichtlich grundsätzlichen Dekarbonisierungsmöglichkeiten, die allen Sektoren zur Verfügung stehen. Unterschieden werden hierbei, wie auch bei den Thesen, die Bereiche Energieanwendung, Energiebereitstellung sowie relevante Querschnittsthemen.

Für eine zukünftige Anwendung der Methodik wäre es denkbar, den Expertenkreis weiter zu vergrößern, sodass dessen Expertise in jedem wichtigen Themenbereich bei der Identifikation und Einschätzung des Forschungsbedarfs vorhanden ist.

## Literaturverzeichnis

- [1] Sektorsteckbrief Energiewandlung, Strategisches Leitprojekt BMWi – Trends und Perspektiven der Energieforschung, EnFo-2030, DLR Institut für Verbrennungstechnik, Stuttgart 2018
- [2] Sektorsteckbrief Industrie, Strategisches Leitprojekt BMWi – Trends und Perspektiven der Energieforschung, EnFo-2030, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 2018
- [3] Sektorsteckbrief Haushalte, Strategisches Leitprojekt BMWi – Trends und Perspektiven der Energieforschung, EnFo-2030, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 2018
- [4] Sektorsteckbrief GHD, Strategisches Leitprojekt BMWi – Trends und Perspektiven der Energieforschung, EnFo-2030, TU München Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, München 2018
- [5] Sektorsteckbrief Verkehr, Strategisches Leitprojekt BMWi – Trends und Perspektiven der Energieforschung, EnFo-2030, DLR Institut für Verkehrsforschung, Berlin 2018
- [6] Sektorübergreifende Themen in der Energieforschung, Strategisches Leitprojekt BMWi – Trends und Perspektiven der Energieforschung, EnFo-2030, ifo Institut, Universität Münster, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München 2018
- [7] Online-Umfrage in den Forschungsnetzwerken Energie vom Frühjahr 2017, ifo Institut, Zugriff am 23.03.2018, verfügbar unter [https://www.energieforschung.de/lw\\_resource/datapool/systemfiles/elements/files/5EB77B174FB20A52E0539A695E86069F/current/document/171109\\_Auswertung\\_Online\\_Umfrage\\_FNE.pdf](https://www.energieforschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/5EB77B174FB20A52E0539A695E86069F/current/document/171109_Auswertung_Online_Umfrage_FNE.pdf)
- [8] Rasch, M., Regett, A., Pichlmair, S., Conrad, J., Greif, S., Guminski, A., Rouyrre, E., Orthofer, C. u. Zipperle, T.: Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz. Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems. bwk 2017 3, S. 38–42
- [9] Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050, Institut für angewandte Ökologie, Fraunhofer ISI u. Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Berlin 2016
- [10] Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln u. Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung, Basel, Köln, Osnabrück 2014

- [11] Klimaschutzszenario 2050. 2. Modellierungsrunde, Öko-Institut e.V. u. Fraunhofer ISI, Berlin 2015
- [12] Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Dessau-Roßlau 2014
- [13] Energieforschungspolitik, Positionspapier, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Mai 2017, verfügbar unter <https://www.energieforschung.de/konsultationsprozess/positionen>
- [14] Strukturelle Anforderungen der deutschen Industrie an das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, BDI Bundesverband der Deutschen Industrie e.V., Juli 2017, verfügbar unter <https://www.energieforschung.de/konsultationsprozess/positionen>
- [15] Impulse für das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, Januar 2018, verfügbar unter <https://www.energieforschung.de/konsultationsprozess/positionen>
- [16] Schwerpunkte und Impulse für das 7. Energieforschungsprogramm. Ein Positionspapier des Forschungsbereichs Energie der Helmholtz-Gemeinschaft, Dezember 2017, verfügbar unter <https://www.energieforschung.de/konsultationsprozess/positionen>
- [17] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Glossar der wichtigsten Begriffe zum 7. FRP, Zugriff am 23.03.2018, verfügbar unter <http://www.forschungsrahmenprogramm.de/glossar.htm>
- [18] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Verbundforschung, Zugriff am 23.03.2018, verfügbar unter <http://www.nks-kmu.de/foerderung-verbundforschung.php>
- [19] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Verbundforschungsprojekt, Zugriff am 23.03.2018, verfügbar unter <http://www.horizont2020.de/einstieg-verbundforschung.htm>
- [20] Krull, W. und Tepperwien, A., Neue Herausforderungen für die öffentliche und private Forschungsförderung, in Handbuch Wissenschaftspolitik, D. Simon, A. Knie, S. Hornbostel, K. Zimmermann, (Eds.), Springer Fachmedien Wiesbaden 2016, Seiten 447-463.
- [21] Stellungnahme zum fünften Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2015, Löschel, A., Erdmann, G., Staiß, F. u. Ziesing, H. J., Berlin, Münster, Stuttgart 2016

- [22] Energieforschungsförderung – Positionspapier von Startups aus der Energiebranche, Schäfer, C., Rath, C., Jungkamp, L., Sichert, A., Zenger, C., Futterer, J., Gebauer, T., Gebauer, A., 25.08.2017, verfügbar unter <https://www.energieforschung.de/konsultationsprozess/positionen>
- [23] Stellungnahme. Empfehlungen für das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung – Mit der Digitalisierung in die nächste Phase der Energiewende starten, bitkom Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e.V., 14.11.2017, verfügbar unter <https://www.energieforschung.de/konsultationsprozess/positionen>
- [24] UnternehmerTUM 2018, <https://www.unternehmertum.de/xpreneurs.html?lang=de>, abgerufen am 14.02.2018
- [25] UnternehmerTUM 2018, <https://www.unternehmertum.de/>, abgerufen am 14.02.2018
- [26] Urban Living Labs - ein neues Forschungskonzept zur Modellierung von Energiesystemen, Tobias Papenfuhs, Semesterarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, in Zusammenarbeit mit AIT Wien, Januar 2018

# **Anhang**

## **A.1. Sektorsteckbrief Energiewandlung**

# **Sektorsteckbrief Energiewandlung**

## **Strategisches Leitprojekt Trends und Perspektiven der Energieforschung**

Teilprojekt:

Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende

(FKZ 03ET4036 X-Z)

### **Autorinnen und Autoren:**

Prof. Dr. Manfred Aigner, Dr. Wolfgang Meier, Dr. Christoph Arndt,  
Dr. Marina Braun-Unkhoff

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Verbrennungstechnik  
Pfaffenwaldring 38, 70569 Stuttgart

Stuttgart, 26.04.2018

**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036 X-Z durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

**Kontakt:**

Dr. Wolfgang Meier  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Verbrennungstechnik  
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

**Gefördert durch:**



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

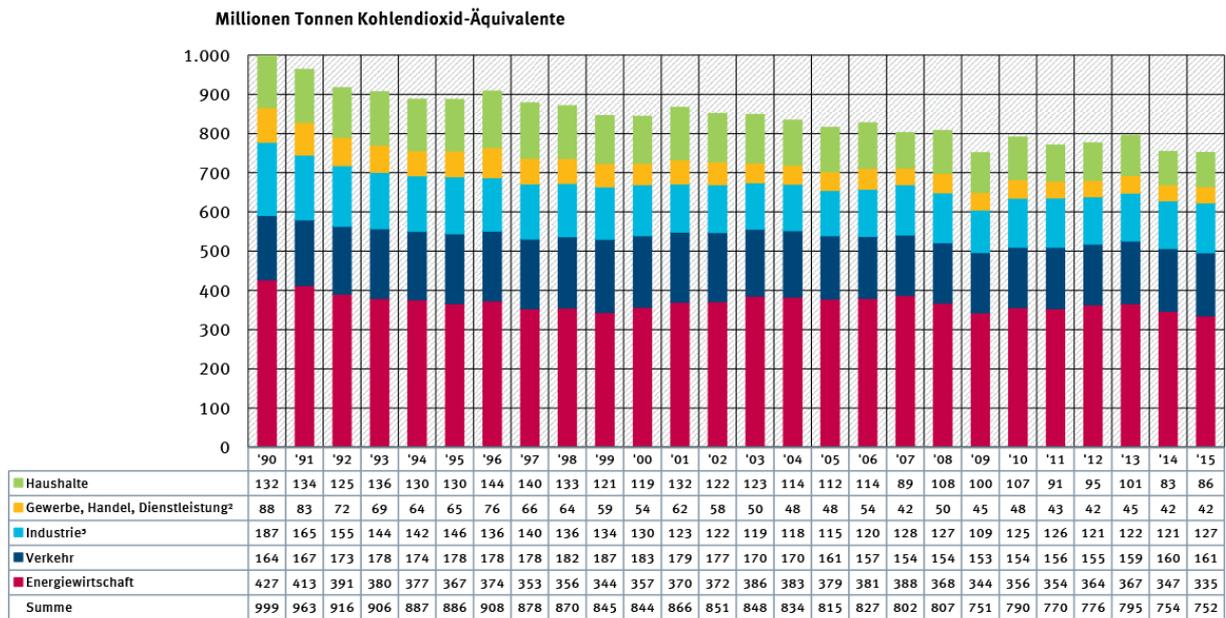
# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>1 Charakterisierung des Sektors</b> .....	<b>1</b>
1.1 Definition und Abgrenzung .....	1
1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung .....	2
1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen .....	3
<b>2 Herausforderungen für den Sektor</b> .....	<b>5</b>
2.1 Energie- und Klimaziele.....	5
2.2 Energie- und Emissionseinsparungen .....	6
2.2.1 Primärenergie .....	6
2.2.2 CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	9
<b>3 Relevanter Forschungsbedarf zur Zielerreichung</b> .....	<b>12</b>
3.1 Gasturbinenkraftwerke und Gasmotoren .....	12
3.2 Kohlekraftwerke.....	15
3.3 Brennstoffzellen.....	16
3.4 Windenergie .....	18
3.5 Photovoltaik.....	20
3.6 Solarthermie .....	22
3.7 Geothermie.....	24
3.8 Wasserkraft und Meeresenergie.....	25
3.9 Erneuerbare Brennstoffe .....	26
<b>4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms</b> .....	<b>30</b>
4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen .....	30
4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs .....	31
<b>5 Fazit</b> .....	<b>32</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>33</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>34</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>35</b>
<b>Literaturangaben</b> .....	<b>36</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>39</b>

# 1 Charakterisierung des Sektors

## 1.1 Definition und Abgrenzung

Der Sektor Energiewandlung umfasst Kraftwerkstechniken zur Erzeugung von Strom und Wärme, sowie erneuerbare Brennstoffe und deren Herstellungs- und Aufbereitungsverfahren. Im Einzelnen gehören zu den Kraftwerkstechniken Gasturbinen und Gasmotoren, Kohlekraftwerke, Brennstoffzellen, Windenergie, Photovoltaik, Solarthermie sowie Wasserkraft und Meeresenergie. Es werden nur große Anlagen berücksichtigt, und Energiesysteme, die in Gewerbe, Handel, Dienstleistung und Haushalten eingesetzt werden, wie beispielsweise Heizungen und solare Wärme- und Kälteanlagen an Gebäuden, zählen hier nicht zum Sektor Energiewandlung. Im Themenbereich „Brennstoffe“ werden biomassebasierte Brennstoffe behandelt, sowie synthetische Brennstoffe, die mit Überschussenergie aus Wind- und Solaranlagen oder konzentrierter Sonnenstrahlung erzeugt werden. Bei der Beurteilung der Forschungsbedarfe stehen technologische Maßnahmen im Vordergrund. Die Motivation für die Maßnahmen entspringt im wesentlichen den Kennzahlen und Szenarien für die Energiewirtschaft. Der Anteil der energiebedingten Treibhausgas-Emissionen des Sektors „Energiewirtschaft“ ist in Abbildung 1 im Vergleich zu den Sektoren Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Industrie und Verkehr dargestellt. Der Sektor Energiewandlung war 2015 für 44,5 % der gesamten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich [1] und bietet somit viel Spielraum für Emissionsminderung.



Angaben ohne diffuse Emissionen bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen.  
<sup>1</sup> in Kohlendioxid-Äquivalenten, berücksichtigt sind Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O)  
<sup>2</sup> einschließlich Militär und Landwirtschaft (energiebedingt)  
<sup>3</sup> enthält nur Emissionen aus Industrieerzeugnissen, keine Prozessemissionen

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 bis 2015, Stand 01/2017

Abbildung 1: Entwicklung der energiebedingten Treibhausgas-Emissionen nach Quellentypen [1].

## 1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung

Die Bereitstellung von Strom und Wärme in ausreichender Menge ist für alle Bereiche der Wirtschaft und Gesellschaft von essenzieller Bedeutung. Deshalb muss der Versorgungssicherheit bei allen Maßnahmen der Energiewende hohe Priorität eingeräumt werden. Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland bis 2022 ergeben sich zudem neue Geschäftsbedingungen für die Energieversorgungsunternehmen (EVUs). Mit zunehmendem Ausbau von Wind- und Solarenergie wird die Nutzung fossiler Energieträger zurückgehen, jedoch wird aufgrund der Volatilität von Wind und Sonneneinstrahlung die Bereitstellung von Regelenergie aus thermischen Kraftwerken notwendig sein. Insgesamt wird die Reduzierung der Auslastung thermischer Kraftwerke jedoch geänderte Geschäftsmodelle erforderlich machen.

Die ausreichende und gesicherte Verfügbarkeit von Brennstoffen bleibt eine unverzichtbare Voraussetzung für die Strom- und Wärmeerzeugung. Fossile Energieträger, insbesondere Kohle und Erdgas, bleiben für zentrale Großkraftwerke für einen längeren Zeitraum von Bedeutung, wenn auch in reduziertem Ausmaß. Aus Klimaschutzgründen wird Biobrennstoffen und Brennstoffen, hergestellt aus erneuerbaren Energien, eine immer größere Rolle bei der Gestaltung der Strom- und Wärmeversorgung von morgen zukommen.

In Zukunft werden immer mehr Komponenten zum Gesamtenergiesystem beitragen: Zentrale und dezentrale Kraftwerke unterschiedlicher Art, Stromproduktion in privaten Haushalten, unterschiedliche Speichersysteme, Elektrofahrzeuge, Elektrolyseure und weitere Komponenten. Neben energiewirtschaftlichen Verschiebungen gehen damit auch gesellschaftliche Änderungen einher.

Weiterhin ist zu beachten, dass Firmen in Deutschland nicht nur den heimischen Markt mit energierelevanten Produkten bedienen, sondern meist global agieren. Mit Blick auf die Erreichung der deutschen Klimaziele wären z.B. Fördermaßnahmen zur Entwicklung neuer Kohlekraftwerke nicht zielführend, können aber andererseits als Exportgut für den Wirtschaftsstandort Deutschland von Bedeutung sein.

### **1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen**

Die Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen erfordert einen massiven Ausbau regenerativer Energien, insbesondere Solar- und Windenergie. Wegen der Volatilität dieser Energiequellen müssen technische Lösungen entwickelt und ausgebaut werden, um Regelenergie schnell und in ausreichender Menge zur Verfügung zu stellen. Weiterhin werden lokale Ausgleichskraftwerke benötigt, um Netzengpässe zu umgehen. Das erfordert die Entwicklung und den Ausbau von Speichermöglichkeiten. Hier sind insbesondere Batterien und Speicherbrennstoffe zu nennen. Batterien und Pumpspeicherkraftwerke werden nicht ausreichen, um längerfristige Engpässe (länger als ca. 1 Tag) zu überbrücken, wie sie z.B. bei Dunkelflauten auftreten. Dafür müssen thermische Kraftwerke bereit gehalten werden, die schnell und möglichst klimaschonend eingesetzt werden können. Aufgrund der geforderten Flexibilität kommen hier in erster Linie Gaskraftwerke in Betracht.

Die Entwicklung weg von der herkömmlichen Energieversorgung, die hauptsächlich durch thermische Großkraftwerke realisiert wurde, hin zu einem komplexen Energiesystem unterschiedlicher zentraler und dezentraler Anlagen bringt enorme Anforderungen an die Regelung und Stabilität der Stromversorgung sowie die Gewährleistung der Wärmeversorgung mit sich. Die Vernetzung der Komponenten des Gesamtenergiesystems und die Sektorkopplung erfordern die Entwicklung und den Ausbau von Steuerungssystemen, Infrastruktur sowie zahlreicher innovativer Lösungen für Einzelkomponenten.

Die Kraftwerksentwicklung in Deutschland ist geprägt durch den Ausbau regenerativer Energien, den Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 und die sukzessive Abschaltung thermischer Kraftwerke, vorwiegend von Kohle-Kraftwerken. Die abgeschalteten thermischen Kraftwerke werden dabei teilweise als bezahlte Reserve in Bereitschaft gehalten, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Es sind jedoch in den vergangenen Jahren auch große neue Kohlekraftwerke in Betrieb genommen worden.

Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Kilowattstunde in Deutschland verbrauchten Stroms sank in den vergangenen Jahren von 564 Gramm CO<sub>2</sub> in 2014 auf 527 Gramm in 2016. Im Vergleich zu 1990 sind dies 234 Gramm pro Kilowattstunde oder ca. 31 % weniger. Gründe hierfür liegen in einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien am Strommix, einem gestiegenen Erdgasanteil (wegen dessen niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors verglichen mit Kohle), und höheren elektrischen Wirkungsgraden neu ans Netz gegangener Kraftwerke.

Die Anzahl der Bio-Erdgas-Anlagen in Deutschland wird zunehmen, auch wegen des anvisierten Ziels der Bundesregierung einer etwa 20fachen höheren Bio-Erdgas-Einspeisung im Jahr 2020 im Vergleich zu 2011. Dies entspräche etwa 6 % des heutigen Erdgasverbrauchs. Voraussetzung ist die Inbetriebnahme weiterer Aufbereitungs- und Einspeiseanlagen.

## 2 Herausforderungen für den Sektor

### 2.1 Energie- und Klimaziele

Die Klimaziele für diesen Sektor erfordern einen massiven Ausbau erneuerbarer Energien und einen deutlichen Rückgang des Primärenergieverbrauchs, um die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 % oder gar 95 % zu reduzieren. Tabelle 1 zeigt die zeitliche Staffelung der Ziele gemäß den Vorgaben der Bundesregierung [2]. Die Zeile „Treibhausgasemissionen“ stellt die über alle Sektoren summierten Reduktionsziele dar. In der nachfolgenden Zeile ist der geplante Ausbau des Anteils erneuerbare Energien gezeigt. Dieser Anteil am Bruttoendenergieverbrauch soll von 14,9 % (Stand 2015) bis 2050 auf mindestens 80 % ansteigen. Der Primärenergieverbrauch soll gegenüber 2008 bis 2050 um 50 % reduziert werden, der Bruttostromverbrauch um 25 %.

Tabelle 1: Klimaziele [2]

	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 %
<b>Effizienz und Verbrauch</b>					
Primärenergieverbrauch (gegenüber 2008)	-7,6 %	-20 %	→		-50 %
Endenergieproduktivität (2008 – 2050)	1,3 % pro Jahr (2008 – 2015)	2,1 % pro Jahr (2008 – 2050)			
Bruttostromverbrauch (gegenüber 2008)	-4,0 %	-10 %	→		-25 %

## 2.2 Energie- und Emissionseinsparungen

### 2.2.1 Primärenergie

Für eine sektorspezifische Betrachtung der Energie- und Klimaziele können bestehende Energieszenarien genutzt werden, um zukünftige Entwicklungen abzusehen und Maßnahmen daraus abzuleiten. Es werden hier acht Energieszenarien betrachtet, die auf der vergleichenden Untersuchung aus [3, 4] basieren. Die Szenarien und die Abkürzungen sind in Tabelle 14 im Anhang zusammengefasst. Alle betrachteten Studien erfüllen folgende Kriterien:

- Zeithorizont der Szenarien mindestens bis 2050
- Veröffentlichungsjahr der Studien ab 2012 (nach Veröffentlichung des 6. Energieforschungsprogramms)
- Emissionsminderungsziele -80 % und -95 % THG-Emissionen werden abgedeckt
- Alle relevanten Emissionsquellen sind berücksichtigt; gesamtwirtschaftliche Betrachtung mit allen Sektoren

Tabelle 3 und das daraus gebildete Balkendiagramm zeigen den prognostizierten Primärenergieverbrauch für das Jahr 2030 sowie Vergleichszahlen von 2010. Die verschiedenen Szenarien zeigen zahlenmäßig sehr unterschiedliche Entwicklungen, die Trends sind jedoch konform. Wie zu erwarten, wird ein deutlicher Rückgang fossiler Energieträger und ein Zuwachs regenerativer Quellen prognostiziert. Für den Blick ins Jahr 2050, bzw. 2060, (Tabelle 3 und zugehöriges Diagramm), zeigen die Szenarien ebenfalls kein einheitliches Bild. Der nach Tabelle 1 anvisierte Rückgang des Primärenergieverbrauchs (50 % von 2008 bis 2050) wird danach nicht in allen Szenarien erreicht. Die Entwicklung einzelner Energieträger wird sehr unterschiedlich gesehen, generell jedoch mit großen Anteilen Erneuerbarer. Die thermische Wandlung von Biomasse übertrifft in den Studien KSZ-KS90 und KSZ-KS95 die der fossilen Energieträger. Für eine Reduktion der THG-Emissionen um 95 % ist klar zu erkennen, dass fossile Energieträger kaum noch einen Beitrag liefern.

Tabelle 2: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2030 in PJ / a [4].

	2010	ERP - Ref	ERP - Ziel	KSZ - AMS	KSZ - KS80	KSZ - KS90	KSZ - KS95	LS 2011 - A	LS 2011 - THG95 (2060)
Kernenergie	1533	0	0	0	0	0	0	0	0
Braunkohle	1516	1261	1013	999	705	447	77	323	415
Steinkohle	1773	1326	711	1603	852	636	686	612	663
Mineralöl	3746	3225	2750	2642	2116	1840	1897	2704	2277
Erdgas	3128	2158	1926	2408	2145	2039	1840	2679	2791
Müll und sonstige nicht erneuerbare	231	166	153	280	220	231	216		
Biomasse	1182	1482	1692	1262	1242	1601	1331		
Wasserkraft	75	67	67	85	85	85	85		
Windkraft	136	516	558	721	719	621	740		
Photovoltaik	42	242	251	324	407	300	456		
Sonstige erneuerbare	0	210	494	355	350	203	388	2969	3174
Nettoimport Strom	-64	-191	-25	-155	0	0	77	0	0
sonstige	0	6	5	0	0	0	0		
Summe	13298	10468	9595	10523	8840	8002	7792	9287	9320

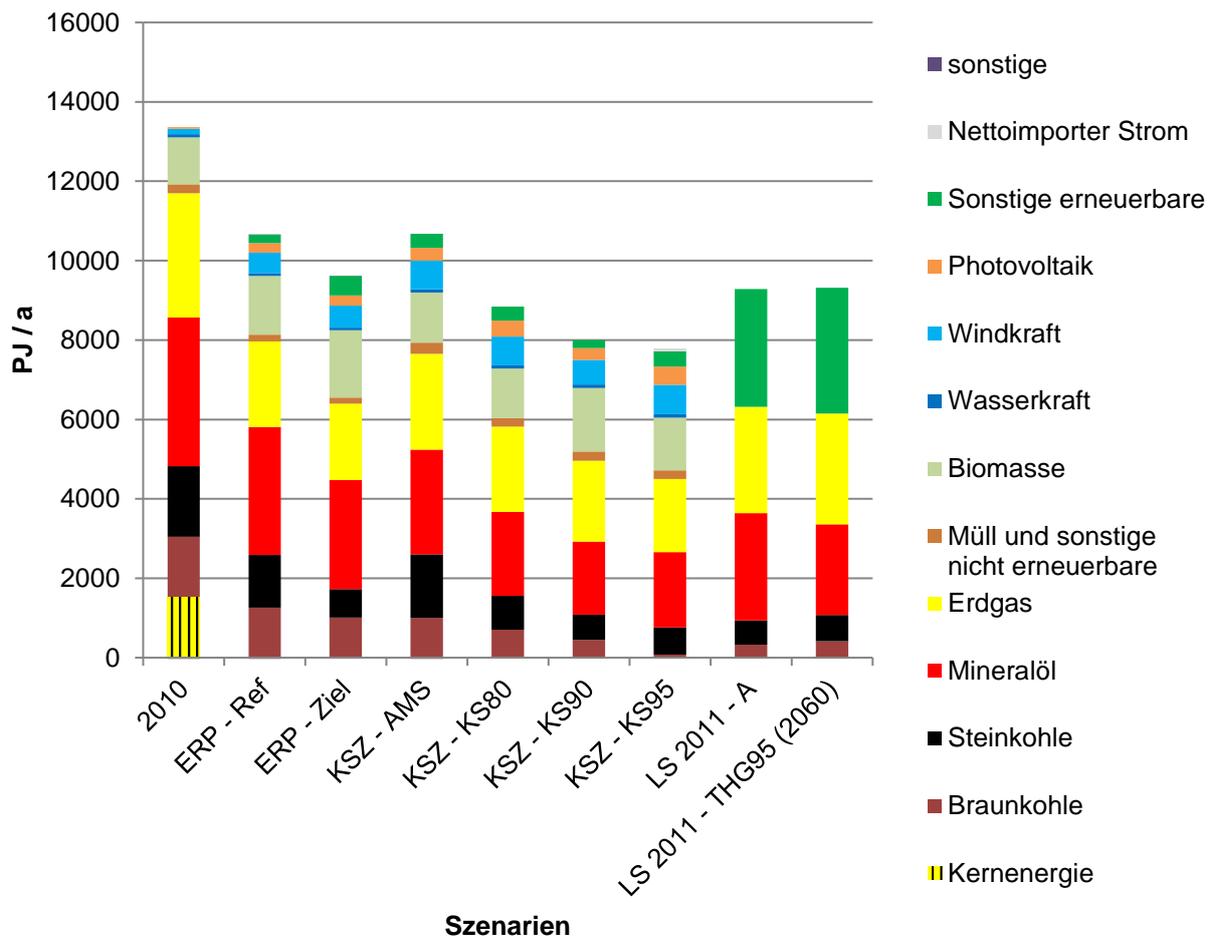
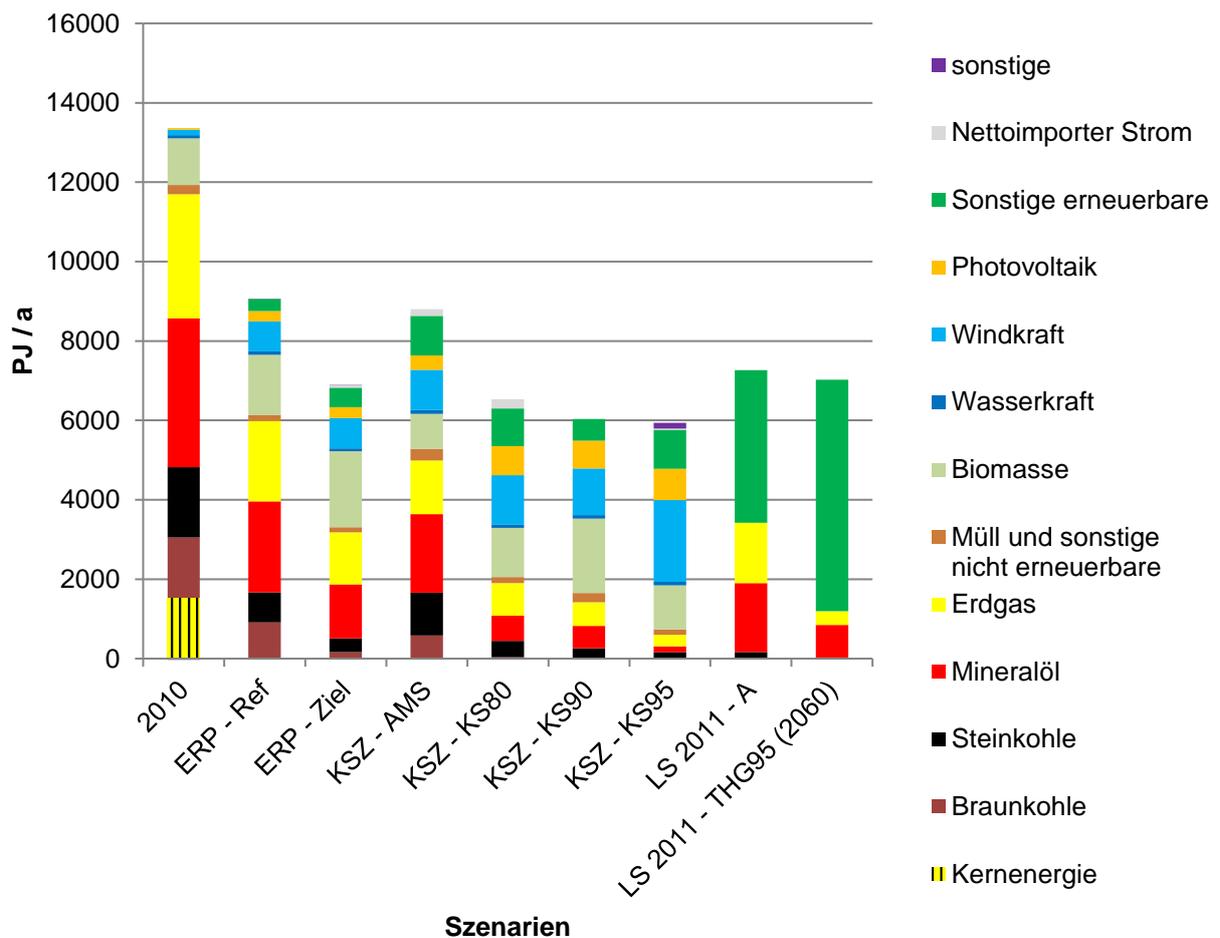


Tabelle 3: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2050 in PJ / a [4].

	2010	ERP - Ref	ERP - Ziel	KSZ - AMS	KSZ - KS80	KSZ - KS90	KSZ - KS95	LS 2011 - A	LS 2011 - THG95 (2060)
Kernenergie	1533	-	-	-	-	-	-	-	-
Braunkohle	1516	917	166	582	36	19	9	-	-
Steinkohle	1773	752	345	1083	407	240	153	166	26
Mineralöl	3746	2296	1360	1973	636	562	151	1740	824
Erdgas	3128	2026	1311	1355	821	600	286	1520	345
Müll und sonstige nicht erneuerbare	231	152	130	285	153	231	140	-	-
Biomasse	1182	1506	1915	890	1237	1873	1107	-	-
Wasserkraft	75	94	67	90	90	91	90	-	-
Windkraft	136	751	769	1017	1239	1170	2058	-	-
Photovoltaik	42	263	271	361	732	701	790	-	-
Sonstige erneuerbare	-	299	494	1000	947	551	980	3840	5829
Nettoimport Strom	-64	-28	57	165,4	238	-	29	-	-
sonstige	-	7	6	-	-	-	143	-	-
Summe	13298	9035	6891	8801	6534	6038	5936	7266	7024

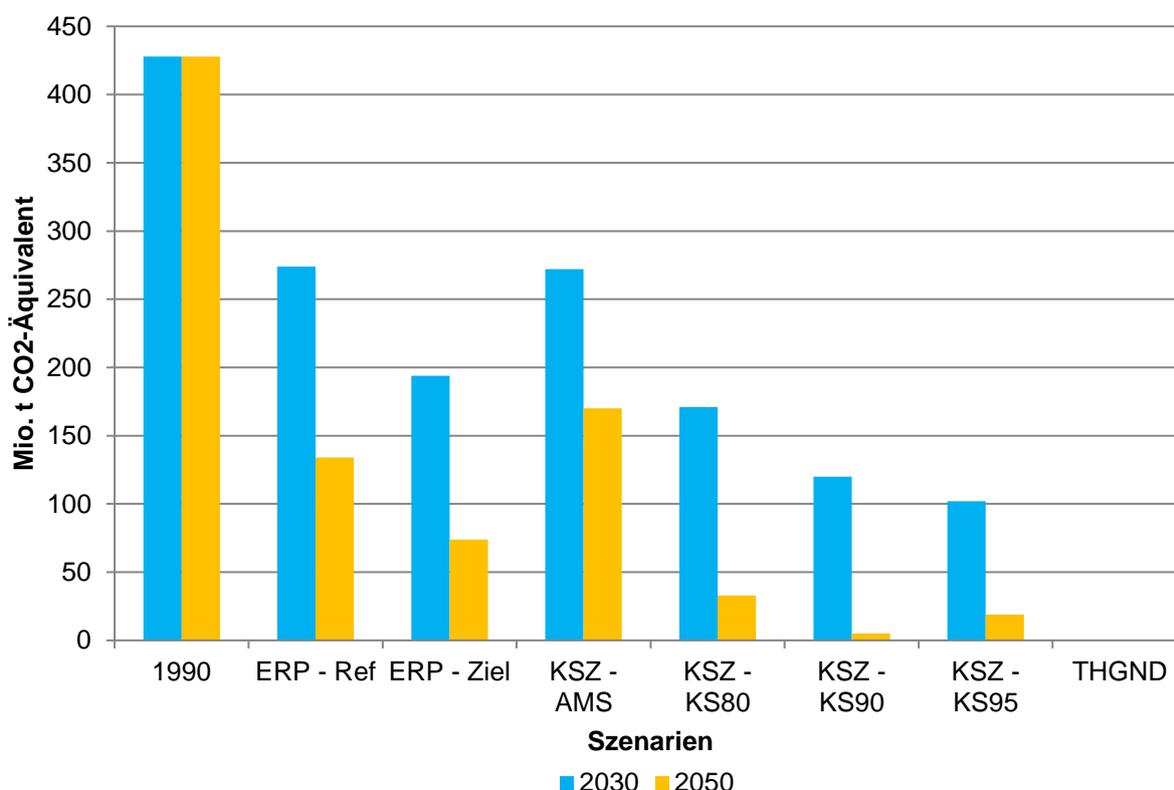


## 2.2.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Treibhausgasemissionen im Energiesektor, die in den Szenarien für 2030 und 2050 ermittelt wurden, sind in Tabelle 4 und dem zugehörigen Diagramm im Vergleich zu den Werten von 1990 dargestellt. In dem Szenario KSZ–AMS werden die Klimaziele klar verfehlt. Es ist zu beachten, dass in diesem Szenario ausschließlich die bereits umgesetzten Maßnahmen bis Oktober 2012 abgebildet sind [4] und deshalb die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen hier wohl unterschätzt wird. In den KSZ-Szenarien und ERP–Ziel werden die Ziele dagegen erreicht. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der einzusparenden THG-Emissionen in 2050 für die verschiedenen Sektoren nach [4]. Es wird deutlich, dass im Energiesektor die Einsparungen je nach Zielsetzung und Szenario zwischen 60 und 100 % liegen.

Tabelle 4: Treibhausgasemissionen im Energiesektor 2030 und 2050 (Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent) [4]

	1990	ERP - Ref	ERP - Ziel	KSZ - AMS	KSZ - KS80	KSZ - KS90	KSZ - KS95	THGND
2030	428	274	194	272	171	120	102	-
2050	428	134	74	170	33	5	19	-



Treibhausgasemissionen im Energiesektor 2030 und 2050 (Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent).

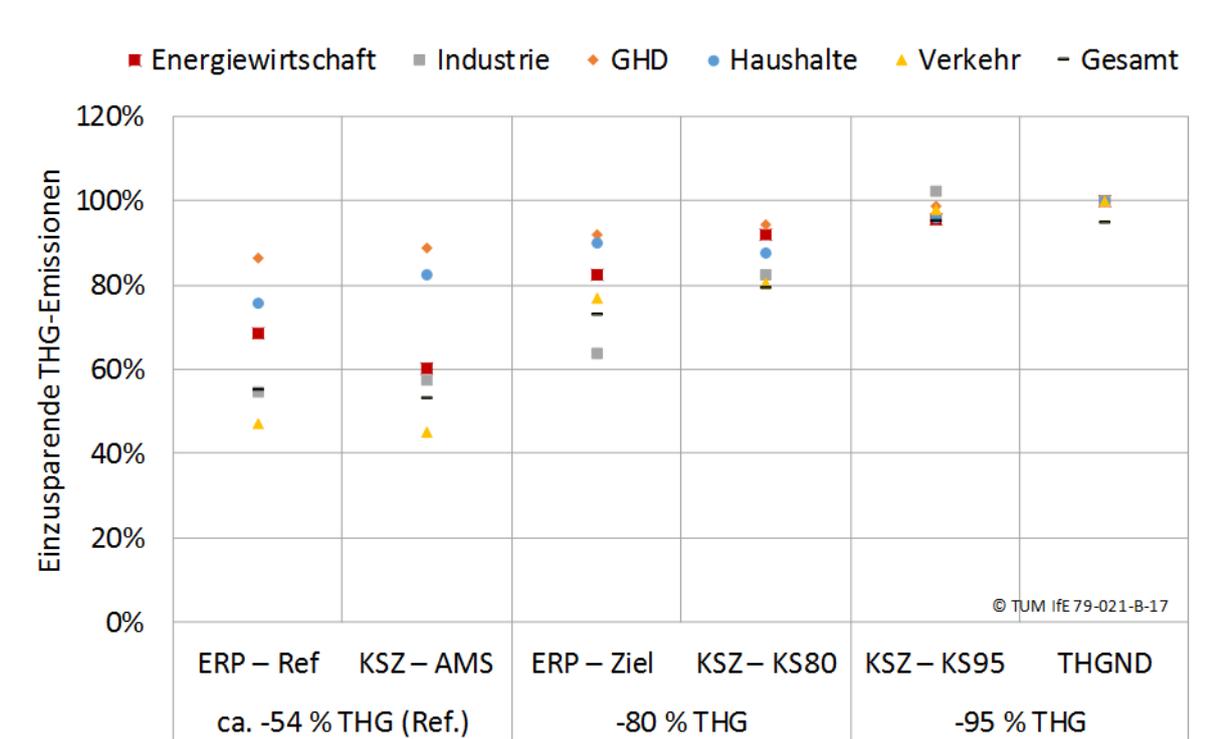


Abbildung 2: Sektorale Aufteilung der einzusparenden THG-Emissionen in 2050 [4]

Im Bereich Energiewandlung leiten sich aus den Klimazielen und Szenarien folgende Handlungs- und Forschungsbedarfe ab:

Zusätzlich zum Ausbau der Kapazitäten CO<sub>2</sub>-neutraler Energiewandlung sollte die Effizienz aller eingesetzten Techniken erhöht werden. Ein Gewinn an Effizienz bedeutet nicht nur eine Einsparung an THG-Emissionen, sondern ist auch ressourcenschonend bezüglich Material, Flächennutzung und Abfall (Stichwort Effizienzsteigerung).

Bei der Transformation des Energiesystems und der Erreichung der Klimaziele in Deutschland ist bisher, wie Tabelle 1 verdeutlicht, erst ein kleiner Teil erreicht und die größeren Anstrengungen – insbesondere auch in finanzieller Hinsicht – sind noch zu bewältigen. Kostenreduktion ist daher bei allen Wandlungstechniken ein wichtiges Entwicklungsziel. Dazu gehört natürlich auch die Minimierung des Ressourceneinsatzes (Stichwort Kostenreduktion).

Wie Tabelle 3 zeigt, wird der Beitrag von Windkraft und Photovoltaik zum Primärenergieverbrauch bis 2050 auf ca. 30 % ansteigen und zur Stromerzeugung auf einen noch deutlich höheren Wert. Die bisherigen Betrachtungen haben nicht explizit die Volatilität dieser Wandlungstechniken berücksichtigt, die zu erheblichen Fluktuationen der Stromeinspeisung führen kann. Hier besteht umfangreicher Entwicklungsbedarf, um die Stabilität der Stromnetze und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten (Stichwort Lastflexibilität).

Tabelle 3 macht weiterhin deutlich, dass Biomasse im betrachteten Zeitraum einigermaßen gleichmäßig mit ca. 1200 PJ/a zur Primärenergie beiträgt. Anteilmäßig bedeutet das

in etwa eine Verdoppelung dieses Beitrags bis 2050 auf ca. 20 % und somit zählt Biomasse zu den Hauptquellen regenerativer Ressourcen. Aufgrund der großen Variation der Eigenschaften biogener Brennstoffe besteht hier Entwicklungsbedarf für eine sichere, effiziente und umweltfreundliche technische Nutzung dieses Energieträgers (Stichwort Brennstoffflexibilität).

Die unter den Stichwörtern Effizienzsteigerung, Kostenreduktion, Lastflexibilität und Brennstoffflexibilität zusammengefassten Entwicklungsziele können nur mit Hilfe technischer Fortschritte, weiterentwickelter Methoden und Materialien sowie neuer Lösungsansätze erreicht werden, die für sich genommen zahlreiche Forschungsaufgaben darstellen.

### 3 Relevanter Forschungsbedarf zur Zielerreichung

Die folgenden Maßnahmenfelder für den Sektor Energiewandlung werden behandelt:

- Gasturbinenkraftwerke und Gasmotoren
- Kohlekraftwerke
- Brennstoffzellen
- Windenergie
- Photovoltaik
- Solarthermie
- Geothermie
- Wasserkraft und Meeresenergie
- Brennstoffe

#### 3.1 Gasturbinenkraftwerke und Gasmotoren

Dieses Gebiet umfasst zentrale und dezentrale Gasturbinenkraftwerke sowie Gasmotoren zur Bereitstellung von Strom und Wärme. Große Gasturbinen werden oft als kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) betrieben mit elektrischen Wirkungsgraden von bis zu 60 %. Dezentrale Anlagen arbeiten vorwiegend als Blockheizkraftwerke (BHKW) mit einer elektrischen Leistung bis zu ca. 10 MW.

Gaskraftwerke werden neben der Deckung der Grundlast zukünftig zunehmend zum Lastausgleich bei fluktuierender Einspeisung von Wind- und Solarstrom beitragen. Dafür werden speziell Gasturbinen benötigt, welche möglichst geringe Investitions- und Stillstandskosten aufweisen. Deshalb werden insbesondere einfache Gasturbinen mit mittlerem Wirkungsgrad und großer Flexibilität zum Einsatz kommen. Ebenso sind dafür kurze An- und Abfahrzeiten sowie schnelle Lastwechsel gefordert. Weiterhin werden regenerativ erzeugte Brennstoffe, z.B. als Speicherstoffe, an Bedeutung zunehmen. Ein Schwerpunkt der Maßnahmen betrifft deshalb die Flexibilisierung dieser Kraftwerke.

Ein Vorteil von Gaskraftwerken liegt in den im Vergleich zu Kohlekraftwerken relativ geringen Investitionskosten, den verminderten CO<sub>2</sub>-Emissionen und den geringen Schadstoffemissionen. Wegen der schnellen Bereitstellung von Regelleistung und Netzstabilisierung durch Redispatch tragen Gaskraftwerke im zukünftigen Energiesystem deutlich zur Versorgungssicherheit und Netzstabilität bei.

Tabelle 5: Forschungsbedarf „Gasturbinenkraftwerke und Gasmotoren“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Steigerung der Lastflexibilität zum Ausgleich fluktuierender Leistung von Wind- und Photovoltaik-Kraftwerken, Bereitstellung von Regelleistung [5, 6].		X			X
Brennstoffflexibilität: Nutzung von Syngas, Schwachgas, Wasserstoff, gasförmige und flüssige Speicherbrennstoffe, die mit Hilfe überschüssigen Stroms hergestellt werden, Abfallprodukte z.B. aus chemischer Industrie [7].	X	X			X
Effizienzsteigerung der Kraftwerke in allen Lastzuständen [8].	X	X	X		
Reduktion der Investitions- und Betriebskosten trotz geringer Auslastung bei hohem Anteil von Wind- und Solarenergie [9].			X		
Schadstoffarme Verbrennung bei Brennstoff- und Lastflexibilität [10].	X	X			
Steigerung der technischen Zuverlässigkeit [11]. Die geforderte Flexibilität hinsichtlich Last und Brennstoff darf keine negativen Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit und Stabilität der Kraftwerke haben.			X		X
Entwicklung neuer Brennerkonzepte, z.B. gestufte oder Jet-stabilisierte Verbrennung [12]. Zielsetzungen sind Erhöhung der Flexibilität und Effizienz.	X	X	X		
Verbesserung der Brennstoffflexibilität von Gasmotoren für die Nutzung von Sondergasen und Schwachgasen, z.B. aus biogenen Quellen [13].	X	X			
Entwicklung von schadstoffarmen Verbrennungsverfahren für Gasmotoren [13].	X	X			
Reduzierung des Wartungsaufwandes für Gasmotoren.			X		
Integration von Gasturbinen oder Gasmotoren in dezentrale Energiesysteme in Zusammenspiel mit Speicher, Netz, Brennstoffsynthese und möglichen weiteren Komponenten [14].	X	X	X		
Weiterentwicklung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Konzepten zur hocheffizienten Wandlung von Brennstoffen [7].	X	X	X		

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

## 3.2 Kohlekraftwerke

Aufgrund der spezifisch hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kohlekraftwerken wird ihr Beitrag an der Strom- und ggf. Wärmeerzeugung in Deutschland stark rückgängig prognostiziert. Deshalb werden aller Voraussicht nach keine neuen Kohlekraftwerke in Deutschland gebaut werden. Bestehende Kohlekraftwerke werden in Zukunft vermehrt zum Lastausgleich für fluktuierende Einspeisung von Wind- und Solarstrom betrieben werden. Vordergründige Forschungsziele in diesem Bereich sind Lastflexibilisierung, Senkung der Betriebskosten und Reduktion der Schadstoffemissionen.

Weltweit werden auch zukünftig neue Kohlekraftwerke unter Beteiligung deutscher Firmen gebaut und in Betrieb genommen werden. Forschungsthemen für neue Kohlekraftwerke über die bereits genannten Themen hinaus sind Effizienzsteigerung durch Optimierung der thermodynamischen Kreisläufe und neue Werkstoffe sowie Technologien mit integrierter CO<sub>2</sub>-Abscheidung.

Tabelle 6: Forschungsbedarf zu „Kohlekraftwerken“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Lastflexibilität und Absenkung der Mindestlast zum Ausgleich fluktuierender Leistung von Wind- und Photovoltaik-Kraftwerken, Bereitstellung von Regelleistung [5, 15].		X	X		X
Minderung der Schadstoffemissionen (Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenmonoxid, Quecksilber) [16].	X	X		X	
Minderung der Treibhausgasemissionen durch Einsatz CO <sub>2</sub> -neutraler Brennstoffe [17].		X	X		X
Reduktion der Betriebskosten, kostengünstige Flexibilisierungsmaßnahmen [18, 19].		X	X		
Effizienzsteigerung und Lebensdauererhöhung für Kohlekraftwerke für den Export.		X	X		
Wirkungsgradsteigerung und Kostenminderung für Kohlekraftwerke mit integrierter CO <sub>2</sub> -Abscheidung [8, 20].	X		X		

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.3 Brennstoffzellen

Brennstoffzellen haben das Potenzial, durch Wandlung von Wasserstoff, synthetischen oder biogenen Brennstoffen zur Minderung von Treibhausgasemissionen beizutragen. Brennstoffzellensysteme für stationäre Anwendungen zeichnen sich durch einen hohen Stromwirkungsgrad sowie durch einen hohen Gesamtwirkungsgrad auf Grund der Möglichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) aus. Der modulare Aufbau ermöglicht eine breite Auslegung in der Leistungsklasse, von ca. 0.7 - 5 kW<sub>el</sub> für die Hausenergieversorgung, bis ca. 100 kW<sub>el</sub> – 100 MW<sub>el</sub> in industriellen bzw. gewerblichen KWK-Anlagen und in sogenannten „Premium-Power“-Anwendungen (zuverlässige Stromversorgung). Die bisher größte Anlage ist eine Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle mit 56 MW<sub>el</sub> in Südkorea. Im stationären Bereich werden mehrere Typen von Brennstoffzellen entwickelt und eingesetzt (PEFC, PAFC, MCFC, SOFC). Die Stromwirkungsgrade können bis zu 60 % betragen, aber eine Kostensenkung durch Massenfertigung hat noch nicht merklich eingesetzt. Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung sind in Japan kommerziell (ca. 200000 Einheiten im Markt) und in Europa noch in der Feldtestphase. Mittlere 100 kW<sub>el</sub>-Anlagen werden kommerziell hauptsächlich in Kalifornien betrieben, während die größeren Anlagen in Ostasien aufgebaut wurden. Mittel- und langfristig ist die Verstromung von Wasserstoff eine effiziente und schadstofffreie Wandlungstechnik. Die Forschungsziele unterscheiden sich je nach Brennstoffzellentypen, jedoch können sie in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Kostensenkung von Kern- und Systemkomponenten
- Materialoptimierung hinsichtlich Kostenreduktion, Stabilität und Leistungsfähigkeit
- Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer unter typischen Einsatzbedingungen
- Verständnis und daraus abgeleitet Verringerung von Degradationseffekten
- Reduktion des Systemaufwands, Optimierung von Betriebsstrategien und Erhöhung der Zuverlässigkeit der Systemkomponenten (BoP)

Tabelle 7: Forschungsbedarf zu „Brennstoffzellen“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Steigerung der Langzeitstabilität, Lebensdauer und Zuverlässigkeit unter typischen Einsatzbedingungen [21-23].		X	X		
Kostenreduktion durch Materialentwicklung, z.B. Reduktion des Einsatzes von Edelmetallen in NTBZ und neue Dichtungskonzepte bei HTBZ [21-23].		X	X		
Kostengünstige Fertigungs- und Montageverfahren für ein „Scale-Up“ der Produktion, geeignete Qualitätssicherungsverfahren [21, 23]	X	X	X		
Entwicklung kostengünstiger und zuverlässiger Komponenten des Balance of Plant, Systemvereinfachung [21-23]		X	X		X
Nutzung von synthetischen Kraftstoffen und Biogas [23]	X	X			
Entwicklung von Simulations- und Modellierungswerkzeugen zur quantitativen Beschreibung des Betriebs- und Alterungsverhalten [24].		X	X		
Vergleichende und verbesserte Lebenszyklusanalyse (z.B. mit Akkumulatoren) [25].	X		X	X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.4 Windenergie

Die Windenergie in Deutschland weist große Zuwachsraten auf. Nach 2030 entfällt auf die Windenergie der größte Anteil an der deutschen Stromerzeugung [5]. Dabei wird der Anteil der Stromerzeugung aus Offshore-Windkraftanlagen deutlich zunehmen. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielen darauf ab, die Stromgestehungskosten weiter zu senken und den Ausbau der Windenergie an anspruchsvollen Standorten zu unterstützen, z.B. Off-Shore, Schwachwindgebiete und bergiges Gelände [26, 27]. Forschungsschwerpunkte liegen insbesondere im Bau größerer und effizienterer Windenergieanlagen mit reduzierten Kosten und erhöhter Zuverlässigkeit. Fortschrittliche Konzepte zur Logistik bei Aufbau, Wartung und Rückbau der Anlagen sowie bei der Netzanbindung können erheblich zur Kostenreduktion beitragen. Verbesserte Methoden zur Vorhersage der Windbedingungen und Ertragsprognose werden das Investitionsrisiko bei der Erschließung anspruchsvoller Standorten reduzieren. Durch intelligente Regelmechanismen kann der Parkertrag maximiert werden sowie die Netzstabilität und Versorgungssicherheit weiter verbessert werden. Schließlich sind Beeinträchtigungen der Umwelt und Bevölkerung, z.B. durch Lärm und Vogelschlag ein wichtiges Thema für die gesellschaftliche Akzeptanz der Windenergie.

Tabelle 8: Forschungsbedarf zu „Windenergie“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Leistungssteigerung von Windanlagen durch optimierte Verfahren zur Standortfindung, Bewertung der Windverhältnisse und des Geländeeinflusses, sowie Erfassung thermischer Effekte [26, 27].	X		X		X
Weiterentwicklung der Anlagentechnik, Leistungselektronik und Generatoren einschließlich Zustandsüberwachung. Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauern. Kostenreduktion [28].	X	X	X		X
Leistungssteigerung und Lärmreduktion durch Verbesserung der Aerodynamik von Rotorblättern. Entwicklung von „smart blades“ (aktive Rotorblätter) [29, 30].	X	X	X	X	
Kostenreduktion bei Rotorblattstrukturen und Produktionsmethoden [29, 30].	X	X	X		
Neue Materialien für Rotorblätter (Festigkeit, Gewichtsreduktion) [29] Tragstrukturen und Anlagentechnik [27, 28].		X	X		
Optimierung der Gründungen und Tragstrukturen für den Bau größerer und effizienterer Anlagen On- und Off-Shore [27, 28].		X	X		
Weiterentwicklung von Betriebsführung und Regelungskonzepten [26, 27].		X	X		X
Minderung von Schäden für Ökosysteme sowie Flora und Fauna; Beeinträchtigung des Landschaftsbildes; Gesellschaftliche Akzeptanz [28].	X			X	
Verbesserung der Netzanbindung und Logistik (Installation, Wartung, Rückbau) [30].		X	X		
Integration ins Energiesystem, Abstimmung mit anderen Komponenten des Systems, z.B. zum Lastausgleich [27].		X	X	X	X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.5 Photovoltaik

Photovoltaikanlagen dienen der direkten Umwandlung von Sonnenenergie in Strom. Solarzellen werden sowohl dezentral, z.B. auf Dächern, aber auch zentral in Photovoltaik-Kraftwerken installiert. Vor allem durch ständige Kostenreduktionen in der Herstellung von PV-Modulen ist der Ausbau in den vergangenen Jahren weltweit kontinuierlich gestiegen. An vielen Orten weltweit ist die Photovoltaik bereits jetzt konkurrenzfähig oder preiswerter als herkömmliche Formen der Energiebereitstellung, wie fossile oder Atomkraft (allerdings ohne Speicher natürlich fluktuierend mit der lokalen Einstrahlungsbedingungen).

Die Industrie in Deutschland ist vor allem führend in der Herstellung von Produktionsanlagen und Materialien für den weltweiten Markt, die Fertigung von Solarzellen selbst hingegen ist rückläufig. Für Solarzellen bieten sich eine Vielzahl von technischen Varianten an, angefangen von klassischen, marktdominierenden Silizium-Solarzellen über Stapelzellen hin zu auf organischen Halbleitern basierender Photovoltaik. Das theoretisch erreichbare (Wirkungsgrad-) Potenzial von aktuellen Solarzellentechnologien ist bis jetzt noch nicht ausgeschöpft. Es ist davon auszugehen, dass zukünftige technologische Innovationen zu einer erheblichen weiteren Kostensenkung von Solarstrom führen werden.

Allen technischen Varianten gemein ist Forschungsbedarf in den Bereichen Wirkungsgradsteigerung, Verminderung des Materialeinsatzes und eine schnellere Übertragbarkeit von Herstellungsverfahren im Labormaßstab hin zur industriellen Produktion.

Tabelle 9: Forschungsbedarf zu „Photovoltaik“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Erhöhung des Wirkungsgrades und der Lebensdauer von Solarzellen und Modulen [31, 32].	X	X	X		
Verringerung von Materialeinsatz und Energie in der Produktion [29, 31].		X	X		
Ausschließliche Nutzung von quasi unbegrenzt verfügbaren, umwelt-technisch unbedenklichen Materialien [29, 31]		X	X		
Wiederverwendung von photovoltaischen Elementen und Substraten [31]	X		X		
Verbesserung von Wirkungsgrad, Lebensdauer und Produktionstechnologie für Dünnschichtmodule (CIGS, CdTe, hybrid inorganisch-organisch oder organisch) [29, 31].		X	X		
Entwicklung industriell anwendbarer Herstellungsverfahren für Stapelzellen auf c-Si-Basis [32].		X			
Langzeitstabilität und Effizienz für unterschiedlichste Klimabedingungen [31].		X			
Entwicklung und massiver Ausbau der bauwerksintegrierten Photovoltaik (z.B. Fassadenelemente) [31].		X		X	
Optimierung der Qualitätssicherung und des Monitorings von PV-Kraftwerken [31].		X			X
Verbesserung der Prognose der PV-Leistung (Orts-, Zeit- und Installationsabhängig) [31].	X				X
Reduktion von Material- und Energieverbrauch bei der Modulherstellung & Wiederverwertbarkeit von Modulkomponenten und Materialien [31].	X	X	X		

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.6 Solarthermie

In solarthermischen Kraftwerken wird Sonnenenergie gebündelt, um mit Turbinen und Generatoren Strom zu erzeugen. Da für diese Technologie hohe direkte Einstrahlung benötigt wird, ist sie vor allem in Ländern mit starker Sonneneinstrahlung, wie Südeuropa oder Afrika attraktiv.

Schwerpunkte für die Forschung sind die allgemeine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Kostensenkung des Heliostatfeldes und optimiertes Receiverdesign

Tabelle 10: Forschungsbedarf zu „Solarthermie“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Entwicklung neuer Hybridkraftwerke (z.B. CSP-PV; CSP + Biom.) [33, 34].		X	X		X
Entwicklung kostengünstiger thermischer Speicher [33]		X	X		X
Optimierung des konventionellen Teils der Kraftwerkstechnik von solarthermischen Kraftwerken in Bezug auf ein schnelleres Lastwechselverhalten.		X	X		X
Erhöhung der Wüstentauglichkeit und Minimierung des Wasserverbrauchs [33].		X	X		X
Erhöhung der Receiver-Austrittstemperaturen zur Steigerung des Systemwirkungsgrads [33].		X	X		X
Kostenoptimierte thermische Speicher für solarthermische Kraftwerke [33].		X	X		X
Verbesserung des optischen und thermischen Wirkungsgrades des Konzentrators / Receivers [33]		X	X		X
Gewichtsreduktion durch Struktur- und Materialoptimierung von Kollektoren und Konzentratoren [33].		X	X		X
Automatisierung des Anlagenbetriebs durch Nutzung hochauflösender lokaler Strahlungsvorhersage (nowcasting) [33, 34].		X	X		X
Optimierung der Fertigungs- und Montagelogistik (BIM) u. Nutzung von Rapid Prototyping / additiven Fertigungsverfahren (3D Druck) für Schlüsselkomponenten um Entwicklungszyklen zu beschleunigen [33].		X	X		X

Hoch aufgelöste optische Messtechnik (ggf. als Flugdrohnen) zur beschleunigten Inbetriebnahme sowie zur Erfassung des Betriebs-, Verschmutzungs- und Degradationszustands von Solarfeldern und Receivern in Verbindung mit maschinellem Lernen.		X	X		X
Entwicklung von Messverfahren, die zur Zertifizierung von Komponenten und Systemen im Labor oder in Kraftwerksumgebung eingesetzt werden können.		X	X		X
In-situ Testverfahren zur Abnahme von Kollektorfeldern.		X	X	X	X
Entwicklung beschleunigter Alterungsverfahren für Aussagen über die Lebensdauer der kritischen Komponenten [33].		X	X	X	X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte

**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.7 Geothermie

Geothermie findet in Deutschland hauptsächlich zur Wärmegewinnung, aber auch zur Stromerzeugung Anwendung. Vorrangig wird die hydrothermale Geothermie betrieben, die warme Wasservorkommen im Untergrund erschließt. 2016 betrug die installierte Leistung in Deutschland bei 33 Geothermieanlagen 302 MW<sub>therm</sub> Wärmeleistung und 42 MW<sub>el</sub> elektrische Leistung [35]. Deutschland belegt hierbei global Rang fünf bei der Wärmenutzung geothermischer Energie. Wichtige Forschungsgebiete sind vor allem Datenbanken zu geothermischen Lagerstätten in Deutschland und die Erhöhung der Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit. Zudem bietet die Geothermie als regelbare erneuerbare Energie ein großes Potential zur Netzstabilisierung und zum Ausgleich der schwankenden Produktion anderer erneuerbarer Energiequellen.

Tabelle 11: Forschungsbedarf zu „Geothermie“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Erhöhung der Lebensdauer und Qualität von Systemkomponenten wie Förderpumpen [36].			X		
Senkung des Fündigkeitsrisikos und der Erschließungskosten [37], Weiterentwicklung von Erkundungsmethoden [36, 38].			X		
Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, z.B. durch innovative Bohrtechnologien und -strategien [37].			X		
Verbesserte Produktionstechniken [38].	X	X	X		
Wachstum von Biofilmen und Einfluss auf Korrosion von Verrohrungen und Wärmetauschern.[39]	X	X	X		
Aufbau eines Datenpools zu geothermischen Lagerstätten in Deutschland, Sammeln und Aufbereiten von geologischen und geothermisch relevanten Daten [37].				X	
Dialogorientierte Öffentlichkeitsarbeit zur Verbesserung der Akzeptanz von Geothermieprojekten.[40]				X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.8 Wasserkraft und Meeresenergie

Wasserkraft ist in Deutschland eine etablierte Technologie, die etwa 3 % zur Stromerzeugung beiträgt. Heutige Anlagen sind vor allem Laufwasserkraftwerke in Flüssen, die zur Grundlastdeckung dienen. Weiterhin gibt es einige Pumpspeicherkraftwerke zur Speicherung überflüssiger elektrischer Energie.

Im Gegensatz zu Wasserkraftwerken im Inland besteht bei Anlagen, die auf Meeresenergie beruhen, wie Wellen- oder Gezeitenkraftwerken noch ein hoher Forschungsbedarf. In Deutschland selbst beträgt die prognostizierte neu zu installierende Anlagenleistung bis 2020 lediglich 300 MW<sub>el</sub>, der globale Markt ist jedoch deutlich größer und daher von Bedeutung für die deutsche Industrie.

Tabelle 12: Forschungsbedarf zu „Wasserkraft und Meeresenergie“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Verbesserung des Wirkungsgrades von Laufwasserkraftwerken.	X	X	X		
Neue Baukonzepte, Materialien und Werkstoffe [38].		X	X		
Häufigere Start-Stops und längerer Betrieb bei niedrigen Durchflüssen für Pumpspeicherkraftwerke [41].					
Ökologische Verträglichkeit.	X			X	
Wellenkraftwerke mit Schwimmkörper.	X	X	X		
Kopplung von Wellenkraftanlagen mit Offshore-Windenergieanlagen.	X	X	X		
Wirtschaftliche Nutzung von vorhandenen Potentialen im Bereich der Meeresenergie [42]					

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.9 Erneuerbare Brennstoffe

Für die energetische Nutzung von Biomasse gibt es verschiedene Abbau- und Nutzungswege. In thermochemischen Konversionspfaden wird lignocellulosereiche Biomasse wie Holz, Roh- und Gärreststoffe mittels Vergasungstechnologie zu einem mittelkalorischen Synthesegas umgewandelt. Feuchte, lignocellulosearme Biomasse wie z.B. Klärschlamm und Mikroalgen wird dagegen effizient durch Fermentation zu Biogas (Hauptanteile Methan) gewandelt. Konventionelle (holzartige) Biomasse wird bevorzugt in Großanlagen direktverfeuert, Biomasseabfälle eher in dezentralen Stromerzeugungskonzepten, da sie verstreut anfallen und zudem eine geringe Energiedichte haben. KWK-Anlagen zeichnen sich dadurch aus, dass sie Biomasse (wie auch fossile Brennstoffe) sehr effizient nutzen, wobei durch die gleichzeitige Nutzung von Strom und Wärme Nutzungsgrade von über 90 % erreicht werden.

Aus zumeist trockener Biomasse können über eine thermochemische Umwandlung unter Sauerstoffabschluss und bei hoher Temperatur Synthesegase, Methan und durch Veredlung synthetisches Bio-Erdgas gewonnen werden. Der Methanertrag kann durch Beimischung von Abfall- und Reststoffen aus Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie gesteigert werden. Der Methananteil des bei der Vergärung entstehenden Biogasgemischs kann durch einen Aufbereitungsprozess so weit erhöht werden, dass es ebenfalls in das Erdgasnetz eingespeist werden kann. Ein wichtiger Aspekt ist die Nutzung des Erdgasnetzes als Speicher für Erneuerbare Energien.

Die Power-to-Gas-Technologie (PtG) wandelt überschüssigen Strom per Elektrolyse von Wasser in Wasserstoff und ggf. unter Zugabe von CO<sub>2</sub> in weiteren Schritten in Methan um. Dieses Verfahren wird derzeit intensiv untersucht, und erste Demo-Anlagen sind in Deutschland konzipiert und umgesetzt. Mittelfristig wird die Bereitstellung von nachhaltig erzeugten Brenngasen in spürbaren Mengen erwartet. Forschungsbedarf besteht in nahezu allen Prozessschritten. Zur Betreibung von Brennstoffzellen, auch in KWK-Anlagen, ist die Qualität (Reinheit) der Gase ein wichtiger Aspekt.

Einen weiteren Schritt in diese Richtung stellt die Power-to-Liquid-Technologie (PtL) zur Synthese von flüssigen Kohlenwasserstoffen dar. Flüssige Brennstoffe eignen sich aufgrund ihrer im Vergleich zu gasförmigen Brennstoffen höheren Energiedichte und ihrer physikalischen Eigenschaften sehr gut als Energiespeicher. Durch Wiederverstromung der Brennstoffe ermöglichen PtL-Anlagen so eine intelligente Lastregelung und tragen zur Stabilisierung des Stromnetzes bei. Wegen des ansteigenden Anteils von erneuerbarem Wind- und Sonnenstrom wird eine wachsende Bedeutung von PtL-Brennstoffen erwartet.

Die wirtschaftliche Umsetzung der PtG- und PtL-Technologien erfordert eine Weiterentwicklung und Optimierung der einzelnen Prozesse wie auch ein Scaling-Up der Anlagen. Ebenso unabdingbar sind deutliche Kostenreduzierungen.

Solar-Fuels, die in solarthermischen Kraftwerken nachhaltig erzeugt werden können, werden mittelfristig wegen des noch hohen Forschungs- und Optimierungsbedarfs wichtiger Teilschritte, kaum in großer Menge verfügbar sein. Aufgrund ihres großen Potenzials ist ihre Erforschung jedoch sinnvoll.

Tabelle 13: Forschungsbedarf zu „Brennstoffe“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Brennstoffflexibilisierung: Effizientere Nutzung von schwachkalorigen Abfall- und Prozessgasen wie Vent- und Deponiegase, Kokerei- und Konvertergas. Aufbereitung, Integration, Beimengungen/Gemische [43].	X	X			X
Effizientere Nutzung von biogenen Brenngasen - biogene Gase, Biogas, Biomethan, Bioerdgas, Wasserstoff. Prozess-Optimierung inklusive anfallender Prozeßwärme. Erschließung weiterer Quellen (Rest- und Abfallstoffe). Biomasse-Aufbereitung. Erhöhung der Effizienz und Gasausbeute. Reinheit der Gase. Einspeisung [44].	X	X	X		X
Power-to-Gas (Wasserstoff, Methan, Synthesegas, Gemische): Ausbau und Weiterentwicklung der Technik: Verfahren, Systeme, Gesamtintegration [45].	X	X	X		X
Upscaling der Elektrolyseverfahren. Erhöhung von Lebensdauer, Effizienz, Wirkungsgrad und Flexibilität. Kostensenkung. Untersuchungen in Demoanlage [45].					
Power-to-Liquid (flüssige KW und Alkohole). Ausbau und Weiterentwicklung: Materialien, Komponenten, Integration. CO <sub>2</sub> -Bereitstellung. Chemische Synthese. Speicherung. Erhöhung von Lebensdauer, Effizienz und Wirkungsgrad. Kostensenkung. Demoanlagen [45].	X	X	X		X
Fischer-Tropsch-Synthese (Flüssige KW oxygenierte KW). Erschließung der Quellen. Optimierung der Prozessrouten: Effizienz, Flexibilität, Kosten [2].	X		X		X
Konzepte für effiziente Bereitstellung von Strom und Mobilität: Optimierung der Einzelprozesse, CO <sub>2</sub> -Quellen, Kosten, Verfügbarkeit, Demoanlagen, Menge. Wechselspiel zwischen Brennstoffen für sofortige Stromerzeugung, chemische Speicher und Chemikalienherstellung [2, 46].	X	X	X		X
Solar Fuels: Optimierung der Hauptkomponenten auf Betriebstemperatur, Gesamtwirkungsgrad, Wärmeträgermedien, GT-Kopplung. Potenzialausschöpfung zur kontinuierlichen Stromerzeugung (Hybridbetrieb, Erzeugung von Speicherstoffen). Integration verbesserter thermischer Speicher. Integration von Produkten mit hoher Wertschöpfung [33, 34].	X	X	X		X

---

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

## **4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms**

### **4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen**

Kraftwerkstechnik:

Die Maßnahmen, die durch den zunehmenden Anteil von Wind- und Sonnenenergie im Bereich thermischer Kraftwerke erforderlich werden, waren zu einem großen Teil bereits im 6. Energieforschungsprogramm adressiert. Erhöhung der Flexibilität von Kraftwerksprozessen, insbesondere Lastflexibilität, war ein zentrales Thema. Weitere wichtige Themen waren Effizienzsteigerung, Schadstoffreduzierung, CCS-Technologien und Lastmanagement. Als forschungsstrategisch bedeutsam wurde die COORETEC-Initiative herausgestellt.

Brennstoffzellen:

Im 6. Energieforschungsprogramm wurden die Brennstoffzellen für Verkehr und KWK-Anlagen zusammen mit Wasserstoffproduktion behandelt. Als wichtigste Maßnahmen wurden Kostensenkung, Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer, sowie die Verbesserung von Komponenten aufgeführt.

Windenergie:

Windenergie wird den größten Beitrag zum Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor liefern und ein massiver Ausbau der Windkraftkapazitäten on- und offshore wird erwartet. Im Fokus der Fördermaßnahmen standen Kostensenkung, Ertragssteigerung und Erhöhung der Verfügbarkeit. Einzelne Aspekte waren die Verbesserung von einzelnen Komponenten (z.B. Werkstoffe, Triebstrang, Rotorblätter) sowie übergreifende Aspekte (z.B. aerodynamische Eigenschaften von Windparks, Strömungsverhältnisse, Optimierung der Betriebsprüfung). Für die Windenergienutzung auf See gab es zusätzliche Forschungsthemen wie Gründungselemente, Tragstrukturen, Ertragsprognosen oder Logistikkonzepte. Weiterhin wurde die Akzeptanzforschung für Windenergie herausgestellt.

Photovoltaik:

Kostensenkung und Erhöhung der Lebensdauer gehörten auch in diesem Bereich zu wichtigen Forschungszielen, ebenso wie die Erhöhung des Wirkungsgrads. Angesichts kostengünstiger ausländischer Produkte war die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ein zentrales Thema, z.B. durch Optimierung von Prozesstechniken und Materialeinsparung. Neben Silizium-Wafertechnologie wurden die Dünnschichtsolarzellen im Forschungsprogramm adressiert.

Solarthermie:

Forschungsthemen betrafen hier Reduzierung der Investitionskosten und Reduzierung des Aufwands für Betrieb und Wartung. Höhere Betriebstemperaturen sollten durch neue Wärmeträgermedien erzielt werden. Bei solaren Turmkraftwerken war die Weiterentwicklung des Kraftwerkskonzepts ein wesentliches Ziel. Es wurde herausgestellt, dass Deutschland als Standort für solarthermische Kraftwerke nicht geeignet ist, aber der Import von Solarstrom für Deutschland einen deutlichen Beitrag liefern könnte.

#### Geothermie:

Ein Ziel der Forschungsförderung war auch hier die kostengünstige Nutzung von Wärme und Strom aus geothermischen Reservoiren, wobei insbesondere die Wärmegewinnung im Mittelpunkt stand. Wichtige Förderbereiche waren die Entwicklungen von Bohrtechnologien, Pumpen und Erschließungstechniken, sowie Modellierung und Katalogisierung geothermischer Daten. Aufgrund seismischer Ereignisse lag weiterhin ein Forschungsthema in der Erhöhung der Akzeptanz.

#### Wasserkraft und Meeresenergie:

Die Technik für Wasserkraft ist weitgehend ausgereift. Forschungsbedarf wurde in der umwelt- und naturverträglichen Gestaltung von Wasserkraftanlagen gesehen. Die Nutzung von Meeresenergie erschien für Deutschland nicht wirtschaftlich.

#### Brennstoffe:

Ein Kernpunkt innerhalb des 6. EFP ist die Reduzierung des Anteils fossiler Energieträger für die Strombereitstellung zugunsten der Erhöhung von klimafreundlichen Brennstoffen, unabhängig von den eingesetzten Kraftwerken (zentral/dezentral und Größe). Da Versorgungssicherheit unverzichtbar ist, ist Rückverstromung ebenfalls ein wichtiges Feld. Forschungsbedarf wurde vor allem in der Erschließung weiterer nachhaltiger Brennstoffe und insbesondere in der Weiterentwicklung und Optimierung einzelner Prozessschritte gesehen.

## 4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs

Die Themen des identifizierten Forschungsbedarfs (2017) wurden im 6. EFP bereits adressiert, jedoch haben sich seit Herausgabe des 6. EFP zum Teil die Gewichtungen verschoben.

Im 6. EFP wurden CCS-Technologien als vordergründige Maßnahme zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgeführt. Aufgrund mangelnder Akzeptanz seitens der Bevölkerung wird diese Technologie zukünftig jedoch in Deutschland kaum eine Rolle spielen. Die Nutzung von CO<sub>2</sub> in der Industrie oder zur Herstellung von Speicherbrennstoffen (CCU-Technologien) wird dagegen an Bedeutung zunehmen.

## 5 Fazit

Wesentliche Impulse für die Entwicklung und Anpassung im Energiewandlungssektor entstehen aus den Vorgaben der Energiewende. Ein anderer wichtiger Treiber in diesem Bereich ist die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen, insbesondere für den Export. Daraus ergeben sich unterschiedliche Forschungsziele für die Energiewende und für den internationalen Markt. Während beispielsweise für das deutsche Energiesystem große Flexibilität ein wesentliches Ziel darstellt und Forschungsbedarf bei entsprechenden Komponenten identifiziert wurde, trifft dies auf den Weltmarkt nicht generell zu. Da in vielen Ländern konventionelle Kraftwerke über große Zeitspannen unter Volllast laufen, ist hier Steigerung der Effizienz weiterhin ein vorrangiges Ziel.

Zur Erreichung der Zielsetzungen für Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen im Sektor Energiewandlung Forschungsmaßnahmen verstärkt werden und die Dauer für die Umsetzung der Ergebnisse in marktfähige Produkte und Konzepte verkürzt werden. Weiterhin besteht Forschungsbedarf zur Akzeptanz der CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Sequestrierung in Deutschland, die bei entsprechender gesellschaftliche Akzeptanz eine Option zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen darstellen könnte.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der energiebedingten Treibhausgas-Emissionen nach Quellentypen [1]. ..... 2

Abbildung 2: Sektorale Aufteilung der einzusparenden THG-Emissionen in 2050 [4] .10

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klimaziele [2].....	5
Tabelle 2: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2030 in PJ / a [4]. .....	7
Tabelle 3: Primärenergieverbrauch in Deutschland 2050 in PJ / a [4]. .....	8
Tabelle 4: Treibhausgasemissionen im Energiesektor 2030 und 2050 (Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquivalent) [4].....	9
Tabelle 5: Forschungsbedarf „Gasturbinenkraftwerke und Gasmotoren“ .....	13
Tabelle 6: Forschungsbedarf zu „Kohlekraftwerken“ .....	15
Tabelle 7: Forschungsbedarf zu „Brennstoffzellen“ .....	17
Tabelle 8: Forschungsbedarf zu „Windenergie“ .....	19
Tabelle 9: Forschungsbedarf zu „Photovoltaik“ .....	21
Tabelle 10: Forschungsbedarf zu „Solarthermie“ .....	22
Tabelle 11: Forschungsbedarf zu „Geothermie“ .....	24
Tabelle 12: Forschungsbedarf zu „Wasserkraft und Meeresenergie“ .....	25
Tabelle 13: Forschungsbedarf zu „Brennstoffe“ .....	28
Tabelle 14: Untersuchte Energieszenarien mit Zielen und Abkürzungen .....	39

## Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
BIM	Building Information Modeling
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
EFP	Energieforschungsprogramm
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk
HTBZ	Hochtemperatur-Brennstoffzelle
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
KW	Kohlenwasserstoff
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
NTBZ	Niedertemperatur-Brennstoffzelle
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell
PtL	Power-to-Liquid
PtG	Power-to-Gas
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
THG	Treibhausgas

## Literaturangaben

- [1] Umweltbundesamt: Energiebedingte Emissionen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energiebedingte-emissionen> (24.05.2017),
- [2] Die Energie der Zukunft - Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende 2015, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016.
- [3] Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Stromerzeugung. Karlsruhe: Institut für angewandte Ökologie, Fraunhofer ISI u. Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien 2016
- [4] Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050, Institut für angewandte Ökologie, Fraunhofer ISI und Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien 2016.
- [5] Schlesinger, M., Lindenberger, D., Lutz, C. Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose, 2014.
- [6] Technologische Anforderungen zur Bereitstellung von Ausgleichsleistung für fluktuierende Stromerzeugungsanlagen durch Lastflexibilität von kohle- und erdgasbefeuerten Kraftwerken, Strategiepapier des COORETEC-Beirats, 2010.
- [7] Kraftwerkforschung: Forschungsnetzwerk gestartet (27.03.2017) <http://kraftwerkforschung.info/forschungsnetzwerk-gestartet>
- [8] Der deutsche Weg zur Smart Power Generation FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH 2014
- [9] Markewitz, P., Bongartz, R., Biß, K., in: Energietechnologien der Zukunft, M. Wietschel; S. Ullrich; P. Markewitz; F. Schulte; F. Genoese, (Eds.) Springer Vieweg: 2015.
- [10] Lieuwen, T. C., Yang, V.: Gas Turbine Emissions. New York: Cambridge University Press 2013
- [11] VGB-Standard für Überwachungs-, Begrenzungs- und Schutzeinrichtungen für Gasturbinen. Essen: VGB PowerTech Service GmbH 2016
- [12] Lean Combustion: Technology and Control. Amsterdam: Elsevier 2016
- [13] Merker, G., Teichmann, R.: Grundlagen Verbrennungsmotoren. Springer Verlag 2014
- [14] Energiesystem 2050, Forschungsbereich Energie der Helmholtz-Gemeinschaft. [https://www.helmholtz.de/forschung/energie/energie\\_system\\_2050/](https://www.helmholtz.de/forschung/energie/energie_system_2050/)
- [15] Salzinger, M., Remppis, S., Gutekunst, F., Scheffknecht, G., in: *Proceedings of International ETG Congress 2015: Die Energiewende - Blueprints for the new energy age*, Bonn, Germany, 2015.
- [16] Durchführungsbeschluss (EU) 2017/1442 der Kommission vom 31.7.2017 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates für Großfeuerungsanlagen, 2017.
- [17] Biomass Technology Roadmap, European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling 2014.

- [18] Markewitz, P., Bongartz, R., Biß, K., in: *Energietechnologien der Zukunft*, M. Wietschel; S. Ullrich; P. Markewitz; F. Schulte; F. Genoese, (Eds.) Springer Vieweg: 2015.
- [19] Rehtanz, C., Teuwsen, J.: *Flexibilitätsoptionen im elektrischen Energiesystem*. VGB PowerTech Journal 1-2, 2015, S.
- [20] *Recommendations for research to support CCS deployment in Europe beyond 2020 - Update on CO<sub>2</sub> Capture*, European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants 2013.
- [21] *Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan, Section 3 - Fuel cells*, Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy 2016.
- [22] *Multi-Annual Work Plan 2014 - 2020, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)*
- [23] *Quadrennial Technology Review 2015*, Department of Energy
- [24] *Mehr Power für weniger Geld: FVV forscht an Brennstoffzellen für das Jahr 2025* (01.08.2017)
- [http://www.fvv-net.de/cms/upload/aktuelles/MediaInfo\\_2017-06-01\\_FVV\\_forscht\\_an\\_Brennstoffzellen\\_fuer\\_das\\_Jahr\\_2025.pdf](http://www.fvv-net.de/cms/upload/aktuelles/MediaInfo_2017-06-01_FVV_forscht_an_Brennstoffzellen_fuer_das_Jahr_2025.pdf)
- [25] Belmonte, N., Luetto, C., Staulo, S., Rizzi, P., Baricco, M.: *Case Studies of Energy Storage with Fuel Cells and Batteries for Stationary and Mobile Applications*. Challenges 8, 2017, S. 9
- [26] *Technology Roadmap Wind Energy*, International Energy Agency 2013.
- [27] *Long-term Research Challenges in Wind Energy - A Research Agenda by the European Academy of Wind Energy*. Springer International Publishing 2016
- [28] Hartmann, N., Hussein, N. S., Taumann, M., Jülch, V., Schlegl, T., in: *Energietechnologien der Zukunft*, M. Wietschel; S. Ullrich; P. Markewitz; F. Schulte; F. Genoese, (Eds.) Springer Vieweg: 2015.
- [29] *Forschung für die Energiewende – Die Gestaltung des Energiesystems - Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2016*, Forschungsverbund Erneuerbare Energien 2016.
- [30] *Strategic research and innovation agenda 2016*, European Technology and Innovation Platform on Wind Energy 2016.
- [31] Bett, A., Stalter, O., Glunz, S., Preu, R., Würfel, U., Strauß, P., Rech, B., Schlatmann, R., Brendel, R., Schmidt, J., Bothe, K., Niepelt, R., Rau, U., Colsmann, A., Lemmer, U., Paetzold, U., Richards, B. S., Brabec, C., Dyakonov, V., Egelhaaf, H.-J., Camus, C., Powalla, M., in: *Forschungsziele 2017 - Gemeinsam forschen für die Energie der Zukunft*  
Forschungsverbund Erneuerbare Energien: 2017.
- [32] Jülch, V., Hartmann, N., Hussein, N. S., Schlegl, T., in: *Energietechnologien der Zukunft - Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*, M. Wietschel; S. Ullrich; P. Markewitz; F. Schulte; F. Genoese, (Eds.) Springer Vieweg: 2015.
- [33] Pitz-Paal, R., Hoffschmidt, B., Platzer, W., Fluri, T., Schlegl, T., Stieglitz, R., Wetzel, T., Viebahn, P., in: *Forschungsziele 2017 - Gemeinsam forschen für die Energie der Zukunft*, 2017.

- [34] European Solar Thermal Electricity Association ESTELA: Solar Thermal Electricity - Strategic Research Agenda 2020-2025
- [35] Innovation durch Forschung - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz: Projekte und Ergebnisse der Forschungsförderung 2016, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2017.
- [36] Kalz, D., Huenges, E., Kohl, T., Kuhn, D., Nestler, B., Shao, H., Kuckelkorn, J., Hüsing, F., Vienken, T., in: Forschungsziele 2017 - Gemeinsam forschen für die Energie der Zukunft, Forschungsverbund Erneuerbare Energien: 2017.
- [37] Bundesverband Geothermie GtV: Forschungsbedarf Geothermie
- [38] Bett, A. W., Burger, B., Ebert, G., Philipps, S., Stryi-Hipp, G., Rohrig, K., Strauß, P., Krautkremer, B., Gils, H. C., Hauser, G., Brabec, C. J., Ebert, H.-P., Hauer, A., in: *FVEE Jahrestagung 2011*, 2011.
- [39] Würdemann, H., Westphal, A., Kleyböcker, A., Miethling-Graff, R., Teitz, S., Kasina, M., Seibt, A., Wolfgramm, M., Eichinger, F., Lerm, S.: Störungen des Betriebs geothermischer Anlagen durch mikrobielle Stoffwechselprozesse und Erfolg von Gegenmaßnahmen. *Grundwasser* 21, 2016, S. 93-106
- [40] Milles, U. Kommunikationskonzept Tiefe Geothermie - Bürger durch aktiven und frühzeitigen Dialog besser in Planung und Betrieb einer Anlage einbeziehen BINE Informationsdienst - Energieforschung für die Praxis 2016.
- [41] Jansen, O., Schöner, T. Pumpspeicherkraftwerke - Vergleich unterschiedlicher Konzepte den Regelbedarf der Zukunft zu sichern 34. Dresdner Wasserbaukolloquium (2011).
- [42] Bard, J. Meeresenergie, Forschungsverbund Erneuerbare Energien 2017.
- [43] Walker, M., Bickel, P., Musiol, F., Nieder, T., Schneider, S., Schrempf, L., Memmler, M. Datenquellen und Methodik der AGEE-Stat-Zeitserien zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland - Stromerzeugung und installierte Leistung, Umweltbundesamt 2016.
- [44] Scheffelowitz, M., Rensberg, N., Denysenko, V., Daniel-Gromke, J., Stinner, W., Hillebrand, K., Naumann, K., Peetz, D., Hennig, C., Thrän, D., Beil, M., Kasten, J., Vogel, L. Stromerzeugung aus Biomasse Deutsches Biomasseforschungszentrum 2015.
- [45] Purr, K., Osiek, D., Lange, M., Adlunger, K. Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess, Umweltbundesamt 2016.
- [46] Smart Bioenergy – Wie sieht die Zukunft der Bioenergie aus?, DBFZ-Jahrestagung 2016 (2016).
- [47] Nitsch, J., Pregger, T., Naegler, T., Heide, D., Tena, D. L. d., 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. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global 2012.
- [48] Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2014.

## Anhang

Tabelle 14: Untersuchte Energieszenarien mit Zielen und Abkürzungen

Referenzszenarien	THG-Minderungsziel in 2050	Abkürzung
Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose, Referenzszenario, Trendszenario [5]	-	ERP-Ref
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Aktuelle Maßnahmen Szenario [3]	-	KSZ-AMS
<b>Zielszenarien</b>		
Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose, Zielszenario [5]	80 % (1)	ERP-Ziel
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 80 [3]	80 %	KSZ-KS80
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 95 [3]	95 %	KSZ-KS95
Klimaschutzszenarien 1. Runde, Klimaschutzszenario 90 [3]	90 %	KSZ-KS90
Leitstudie 2011, Szenario A [47]	80 %	LS 2011-A
Leitstudie 2011, Szenario THG95 [47]	95 % (2)	LS 2011-THG95
Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 [48]	95 %	THGND

(1) nur energiebedingte Emissionen

(2) Ziel wird erst 2060 erreicht

**A.2. Sektorsteckbrief Industrie**



# **Sektorsteckbrief**

## **Industrie**

### **Strategisches Leitprojekt**

### **Trends und Perspektiven der Energieforschung**

Teilprojekt:

Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende

(FKZ 03ET4036 X-Z)

#### **Autorinnen und Autoren:**

Andrej Guminski, Dr.-Ing. Serafin von Roon, Dr.-Ing. Christoph Pellingner,

FfE

Am Blütenanger 71, 81671 München

München, 26.04.2018

**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036 X-Z durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

**Kontakt:**

Andrej Guminski

E-Mail: [aguminski@ffe.de](mailto:aguminski@ffe.de)

FfE

Am Blütenanger 71, 80995 München

**Gefördert durch:**

Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>1 Charakterisierung des Sektors</b> .....	<b>3</b>
1.1 Definition und Abgrenzung .....	3
1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung .....	4
1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen .....	8
<b>2 Herausforderungen für den Sektor</b> .....	<b>11</b>
2.1 Energie- und Klimaziele .....	11
2.2 Energie- und Emissionseinsparungen .....	12
2.2.1 Endenergie .....	13
2.2.2 CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	15
<b>3 Forschungsbedarf – relevante Maßnahmen zur Zielerreichung im Sektor</b> ...	<b>18</b>
3.1 Intelligentes Power-to-Heat .....	18
3.2 Erneuerbare Brennstoffe .....	20
3.3 Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien und Prozesse.....	21
3.4 Steigerung der Energieeffizienz.....	22
3.5 Systemfreundliche Eigenerzeugung .....	23
3.6 Solarthermie für Prozesswärme.....	24
3.7 CCU – Carbon Capture and Utilization .....	25
3.8 Nutzung industrieller Abwärme .....	26
3.9 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung in der Industrie .....	27
<b>4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms</b> .....	<b>29</b>
4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen .....	29
4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs .....	30
<b>5 Fazit</b> .....	<b>31</b>
<b>6 Anhang</b> .....	<b>32</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>35</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>36</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>37</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>38</b>

# 1 Charakterisierung des Sektors

Grundlegend wird die Energiewirtschaft in Deutschland in die Endverbrauchersektoren Verkehr, Haushalte, Industrie, GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) und den Bereitstellungssektor untergliedert. Dieser Steckbrief behandelt den Industriesektor und den in diesem Sektor existierenden Forschungsbedarf.

Da die Grenzen zu den übrigen Sektoren zum Teil fließend sind, folgt in Kapitel 1.1 zunächst eine genaue Definition und Abgrenzung des Sektors. Die statistische Definition des Industriesektors liefert die Grundlage dafür, diesem Endverbrauchssektor Emissionen zuweisen zu können (s. Kapitel 2). Letzteres ist notwendig um den Fortschritt des Sektors bezüglich der Erreichung der geltenden Treibhausgas-(THG)-Verminderungsziele zu messen und die voraussichtliche Entwicklung der Emissionen zu prognostizieren. Die Analyse der Differenz zwischen Sektorziel und -trend gibt Aufschluss darüber, an welcher Stelle Forschungsbedarf existiert. Der Forschungsbedarf, der dazu beitragen kann, dieses ausgewiesene Delta im Industriesektor zu minimieren, wird in Kapitel 3 beschrieben und bildet das Kernelement dieses Sektorsteckbriefs.

## 1.1 Definition und Abgrenzung

Dem Industriesektor werden alle Betriebe des verarbeitenden Gewerbes, der Gewinnung von Steinen und Erden sowie des übrigen Bergbaus, mit mehr als 20 Mitarbeitern zugeordnet. Gewerbliche Betriebe mit weniger als 20 Beschäftigten sowie Geschäftsbäude und Räume für gewerbliche Zwecke, Landwirtschaft, Handelsunternehmen sowie private und öffentliche Dienstleistungsunternehmen und Einrichtungen werden dem GHD Sektor zugeordnet. Diese sind somit kein Teil der Industrie (z. B. Banken, Deutsche Post etc.). [1]

Der Industriesektor wird in 14 Wirtschaftszweige bzw. Branchen untergliedert.<sup>1</sup> [2] Dabei kann unter dem Dach eines Wirtschaftszweigs eine Vielzahl an z. T. sehr heterogenen Prozessen vereint werden. Die Branche *Ernährung und Tabak* beinhaltet beispielsweise die Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln, die Getränkeherstellung und die Tabakverarbeitung, welche ihrerseits wiederum unterklassifiziert werden. [3] Tabelle 6-1 im Anhang zeigt die 14 Branchen sowie die nächst feinere Untergliederungsstufe.

Die Abgrenzung des Industriesektors zeigt, wie heterogen dieser aufgestellt ist. Folglich werden für die Ableitung des Forschungsbedarfs detaillierte Kenntnisse über die einzelnen Branchen und deren Prozesse benötigt. Im Folgenden wird die energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung des Sektors in Deutschland dargestellt.

---

<sup>1</sup> Die Begriffe Wirtschaftszweige und Branchen werden fortan synonym verwendet.

## 1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung

Nachdem der Industriesektor in Abschnitt 1.1 definiert wurde, folgt nun die Einordnung des Sektors anhand der Kennzahlen Endenergieverbrauch, THG-Emissionen und Bruttowertschöpfung.

### Energiewirtschaftliche Bedeutung

Die Einordnung des Sektors erfolgt schrittweise. Zu Beginn wird die Industrie aus energetischer Sicht und in Bezug auf die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen mit den anderen Sektoren verglichen. Anschließend werden die Emissionen des Sektors auf die Branchen aufgeteilt. Schlussendlich wird auf die Anwendungen eingegangen, die innerhalb der Branchen für die Verursachung der Emissionen verantwortlich sind.

Abbildung 1-1 zeigt die Aufteilung des Endenergieverbrauchs auf die Endenergiesektoren in Deutschland für das Jahr 2015. Insgesamt lag der Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2015 bei 8.898 PJ. Der Sektor Verkehr war mit 2.621 PJ (~30 %) für den größten Teil des Endenergieverbrauchs verantwortlich. Die Industrie stellt mit 2.547 PJ (~29 %) den zweitgrößten Endenergieverbrauchssektor dar. Auf die beiden Sektoren GHD (~16 %) bzw. Haushalte (~26 %) entfielen zusammen rund 3.729 PJ.

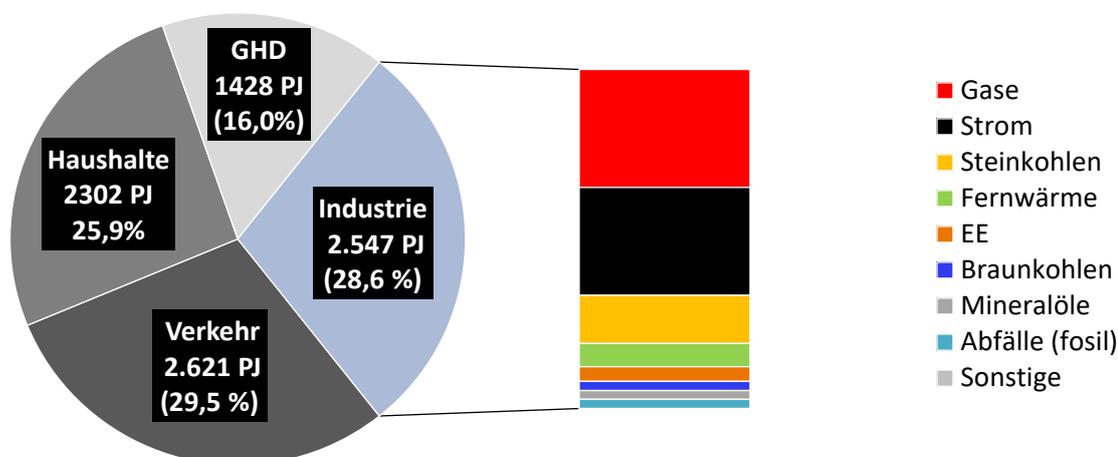


Abbildung 1-1: Endenergieverbrauch in Deutschland 2015 nach Endenergiesektoren und Aufteilung der Industrie nach Energieträgern in PJ [4]

Zu den bedeutendsten Energieträgern in der Industrie zählen Gase (35 %), Strom (32 %) sowie Steinkohle (13 %). Ca. 4 % des Endenergieverbrauchs in der Industrie sind auf Erneuerbare Energien (EE) zurückzuführen. [4]

Abbildung 1-2 zeigt die Bedeutung des Sektors Industrie in Bezug auf die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die gesamten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland lagen 2015 bei 769 Mio. t CO<sub>2</sub>. Der Industriesektor stellt mit 267 Mio. t CO<sub>2</sub> (35 %) den größten CO<sub>2</sub>-Emittenten dar. Wie aus Abbildung 1-2 hervorgeht, entfielen

178 Mio. t CO<sub>2</sub> (23 %) auf die Haushalte, 188 Mio. t CO<sub>2</sub> (24 %) auf den Verkehr und 136 Mio. t CO<sub>2</sub> (18 %) auf den GHD-Sektor.

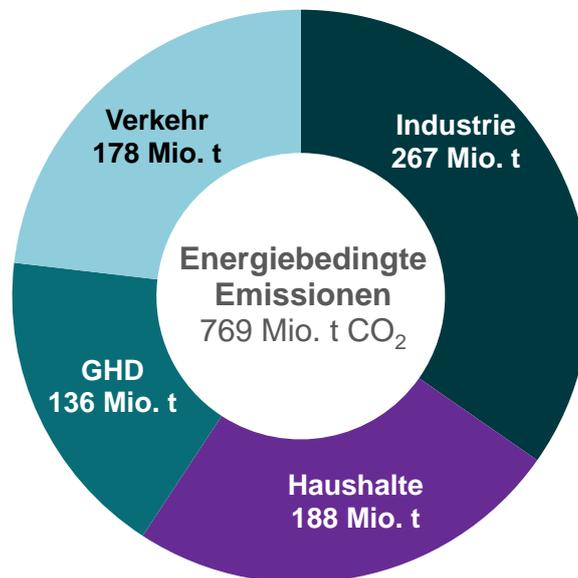


Abbildung 1-2: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach der Verursacherbilanz für Deutschland im Jahr 2015 in Mt CO<sub>2</sub> [4 – 7].

Werden die Emissionen des Industriesektors auf Branchenebene verteilt, so zeigt sich, dass die Metallerzeugung mit einem Anteil von ~25 % (~67 Mio. t CO<sub>2</sub>) der größte CO<sub>2</sub>-Emittent ist (s. Abbildung 1-3). Zweitgrößter Verursacher, mit einem Anteil von ~19 % (~49 Mio. t CO<sub>2</sub>) ist der Wirtschaftszweig „Grundstoffchemie“, der vor allem die Herstellung chemischer Grundstoffe, Düngemittel und Stickstoffverbindungen beinhaltet. Zu den nächstgrößten CO<sub>2</sub>-Emittenten zählen das „Papiergewerbe“ (~8 %), die „Ernährungs- und Tabakindustrie“ (~7 %) und die „Verarbeitung von Steinen und Erden“ (~7 %). [5]

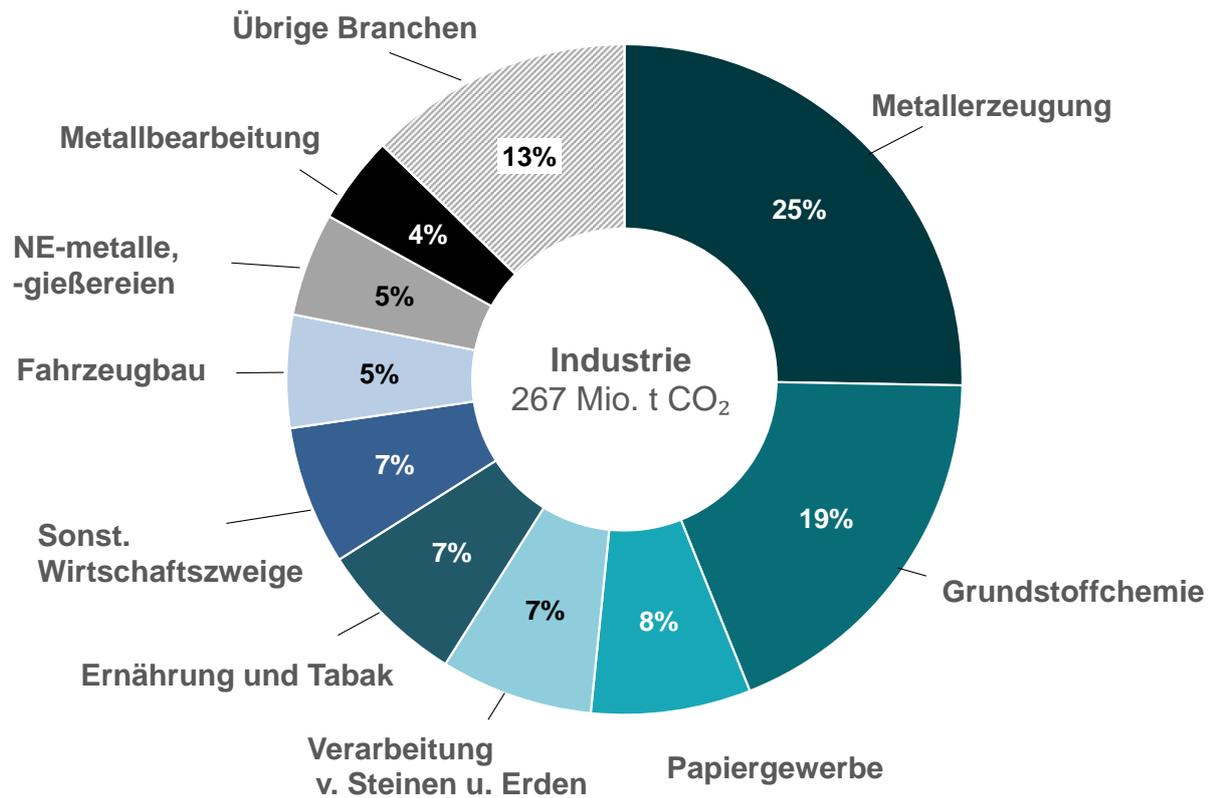


Abbildung 1-3: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der Industrie nach Branchen im Jahr 2015 [4 – 7] /AGEB-02 17/.

Mit Blick auf die Identifikation des Forschungsbedarfs für die Industrie, sind neben der Aufteilung der Emissionen auf Branchen auch die Emissionen je Endanwendung und Energieträger relevant. Über die Hälfte (~55 %) der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Industriesektor sind auf die Bereitstellung der Prozesswärme zurückzuführen. Dabei werden zum größten Teil Erdgas (~20 %) und Kohle (~19 %) eingesetzt. Bei der Erzeugung mechanischer Energie werden rund 33 % der industriellen CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt. Die verbleibenden Emissionen sind der Bereitstellung von Raumwärme, Beleuchtung, Prozesskälte, Klimakälte und der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) zuzuordnen. [5]

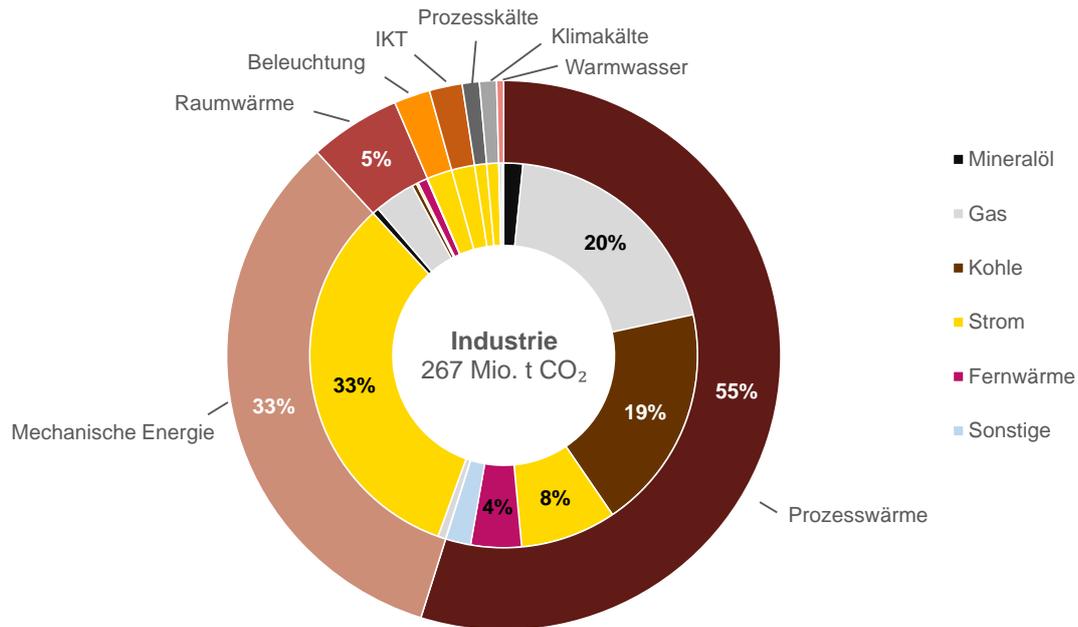


Abbildung 1-4: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen der Industrie nach Anwendungsarten und Energieträgern [4 – 7]

Um Forschungsbedarf für die industrielle Prozesswärmeproduktion identifizieren zu können, ist es notwendig die dahinterstehenden Anwendungen und Temperaturniveaus zu berücksichtigen. Für die Prozesswärmeproduktion werden bisher zum größten Teil brennstoffbasierte Verfahren eingesetzt. Elektrothermische Verfahren nehmen derzeit noch eine untergeordnete Rolle ein. Prinzipiell können die brennstoffbasierten Verfahren zum einen in indirekte Wärmeerzeugung (Heißwasser- und Dampferzeugung mittels Kessel) und zum anderen in die Direktbefeuerung mit Brennstoffen eingeteilt werden. Der Temperaturbereich bis 500° C zur Prozesswärmeerzeugung wird primär durch indirekte Wärmeerzeugung bereitgestellt und ist hauptsächlich in den Branchen Ernährung und Tabak, Papiergewerbe, Chemieindustrie und Fahrzeugbau angesiedelt. Temperaturniveaus ab 500° C werden zum größten Teil über die Direktbefeuerung erzeugt. Anwendungsbereiche finden sich u. a. in der Grundstoffchemie, der Bearbeitung von Steinen und Erden (z. B. Zement- und Kalkherstellung) und in der Metallerzeugung wieder.

### Gesellschaftliche Bedeutung des Sektors

Im Folgenden wird die wirtschaftliche Leistung als Indikator für die gesellschaftliche Bedeutung des Industriesektors in Deutschland herangezogen. In Abbildung 1-5 ist jeweils das Bruttoinlandsprodukt (BIP) aus den Jahren 1991 und 2016 dargestellt und in die Sektoren Land- und Forstwirtschaft, Dienstleistungsbereiche, Baugewerbe und produzierendes Gewerbe (Industrie) unterteilt. Es wird ersichtlich, dass im Vergleich zu 1991 der Anteil des Industriesektors an der Bruttowertschöpfung von über 30 % auf 25,7 % fiel und sich aktuell auf etwa 723 Mrd. € beläuft. In der Zeit zwischen 1991 und 1995 fiel der Anteil der Industrie um knapp 5 % und ist seit 1996 nahezu konstant. Der Anteil des

Dienstleistungssektors, in dem sich Handel, Verkehr und Lagerei sowie Gastgewerbe eingliedern lassen, bis 1995 zunächst stark und seither gleichmäßig zu. [8]

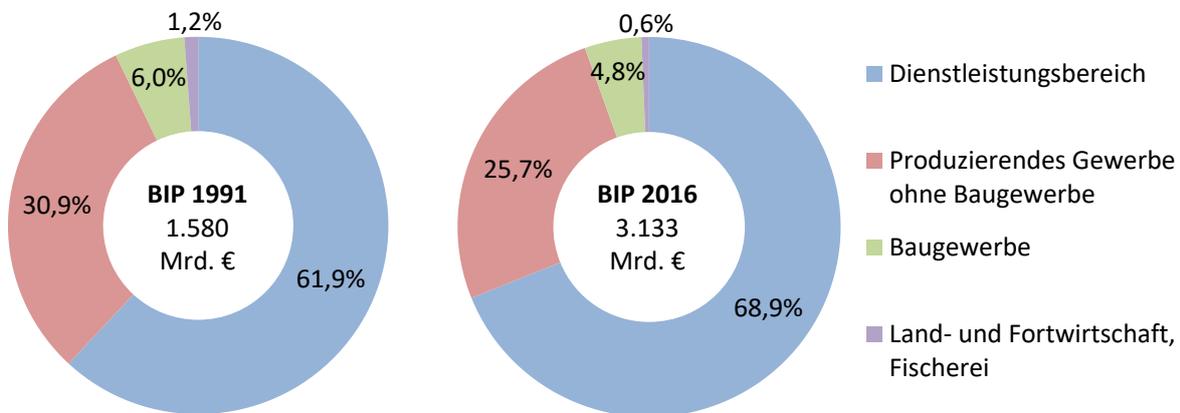


Abbildung 1-5: Aufteilung des Bruttoinlandprodukts auf die Sektoren in Deutschland [8]

Der Anteil des Industriesektors am BIP 2014 lag in Frankreich bei 11,4 % und in Großbritannien bei 9,4 % und war somit in beiden Ländern deutlich geringer als in Deutschland mit 25,9 %. In den EU-Staaten lag der durchschnittliche Anteil der Industrie am BIP 2014 bei ca. 15,3 %. [9] Die in zahlreichen Ländern zu beobachtende Verschiebung der Wertschöpfung weg vom produzierenden Gewerbe, hinein in den Dienstleistungssektor, konnte in Deutschland in der Vergangenheit zwar beobachtet werden, fällt im Vergleich zu den europäischen Nachbarn jedoch deutlich schwächer aus. Die Zahlen zeigen, dass der Anteil des Industriesektors an der Bruttowertschöpfung und somit die wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung des Industriesektors in Deutschland vergleichsweise hoch sind.

### 1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen

Nachfolgend werden ausgewählte technische und sozioökonomische Entwicklungen und deren Auswirkungen auf den Industriesektor beschrieben. Im Detail wird auf die Digitalisierung und die Energiewende in der Industrie sowie prognostizierte sozioökonomische Trends und deren Auswirkungen eingegangen.

#### Digitalisierung in der Industrie und Industrie 4.0 [10]

Durch die Digitalisierung wird im Industriesektor ein grundlegender Strukturwandel vorhergesagt. Vor allem Produktionsprozesse, Geschäftsmodelle und Produkte werden durch die vierte industrielle Revolution maßgeblich verändert. [11] Unter dem Schlagwort „Industrie 4.0“ werden im Wesentlichen vier Komponenten zusammengefasst. Mittels moderner IKT wird eine zunehmende Vernetzung von softwaretechnischen Komponenten mit mechanischen und elektrischen Anlagen ermöglicht (cyber-physische Sys-

teme). Weitere Bestandteile von Industrie 4.0 stellen die intelligente Fabrik, das Internet der Dinge sowie das Internet der Dienstleistungen dar. [10] Es wird zudem erwartet, dass die Geschäftsmodelle von traditionellen Industriegüterherstellern zunehmend mit Dienstleistungsaktivitäten verschmelzen. Grundlage des Geschäftsmodells bleibt das Industriegut, der Fokus verschiebt sich allerdings in Richtung Lösungen und Dienstleistungen rund um das Produkt.

### **Energiewende in der Industrie**

Die Verminderung von THG-Emissionen gilt als eines der wichtigsten Handlungsfelder in der Industrie. Als wesentliche Hebel gelten die Steigerung von Energie- und Materialeffizienz, die Substitution fossiler Energieträger durch Green Fuels oder Strom (Elektrifizierung) sowie die direkte Nutzung Erneuerbarer Energien (z. B. solarthermische Prozesswärme).

Durch den steigenden Anteil fluktuierender Stromeinspeisung aus Erneuerbaren Energien wird der Bedarf an Speicherlösungen voraussichtlich zunehmen. In diesem Zusammenhang wird auch der Beitrag, den die Industrie durch die Flexibilisierung von Prozessen und Querschnittstechnologien leisten kann, untersucht. Hierbei stehen in erster Linie stromintensive Prozesse wie z. B. die Aluminiumelektrolyse im Vordergrund. Durch eine zunehmende Elektrifizierung der Prozesswärmebereitstellung könnten jedoch in Zukunft weitere Flexibilitätspotenziale erschlossen werden.

Für nahezu alle Industriebranchen wird für das Jahr 2030 ein geringerer Energieverbrauch als 2013 prognostiziert. Bei gleichzeitiger Zunahme der Wertschöpfung in allen Branchen (zwischen 2013 und 2030 um durchschnittlich 1,1 % p.a.) resultiert hieraus ein Rückgang der Energieintensität (Endenergieverbrauch bezogen auf Wertschöpfung) für alle Industriebranchen bis 2030. [11]

### **Sozioökonomisch**

Trotz rückläufiger Erwerbstätigenzahl wird ein Wachstum bei der Wertschöpfung prognostiziert. Die Zunahme der Wertschöpfung bei gleichzeitigem Rückgang der Zahl der Erwerbstätigen impliziert eine Steigerung der Arbeitsproduktivität von 2013 bis 2030. Gründe hierfür liegen vor allem bei den Auswirkungen der Digitalisierung, welche beispielsweise zu einer zunehmenden Automatisierung von Prozessen und Tätigkeiten führt. Darüber hinaus führt eine überdurchschnittlich starke Zunahme der Nachfrage von hochwertigen Produkten (z. B. elektronische Produkte), unter anderem durch zusätzliche Anwendungsbereiche im Zuge der Digitalisierung, insgesamt zu einem Anstieg der Bruttowertschöpfung. [11]

Der demographische Wandel bzw. die zunehmende Alterung der Bevölkerung führt zu einer Verknappung des Angebotes an Arbeitnehmern. Hieraus resultiert insgesamt eine verstärkte Nachfrage nach qualifizierten Arbeitskräften und einem größeren Konkur-

renzdruck der Unternehmen innerhalb des Sektors. Diese Entwicklung kann vor allem durch die Digitalisierung der Arbeitswelt sowie durch Migration teilweise abgemildert werden. In welchem Umfang Letzteres möglich ist, hängt allerdings stark von der künftigen Zuwanderung und damit von politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Gegebenheiten in Deutschland sowie den Herkunftsländern ab. [11].

## 2 Herausforderungen für den Sektor

In diesem Abschnitt werden zunächst die sektorspezifischen Energie- und Klimaziele erläutert. Anschließend werden, basierend auf einer Szenarioanalyse, die Herausforderungen für den Industriesektor diskutiert.

### 2.1 Energie- und Klimaziele

Der 2016 erschienene Klimaschutzplan 2050 soll den Weg in ein weitgehend treibhausgasneutrales Deutschland bis zum Jahr 2050 aufzeigen. Dafür sind erstmals auch Klimaziele in Form von Zielen zur Treibhausgasverminderung für den Industriesektor definiert worden. Das Jahr 2030 dient als Meilenstein bzw. Zwischenziel für den Klimaschutzplan 2050. Abbildung 2-1 zeigt den Grad der Zielerreichung für das Minimal- und Maximalziel (Treibhausgasverminderung von 49 % bis 51 % ggü. 1990). [12], [6], [4]

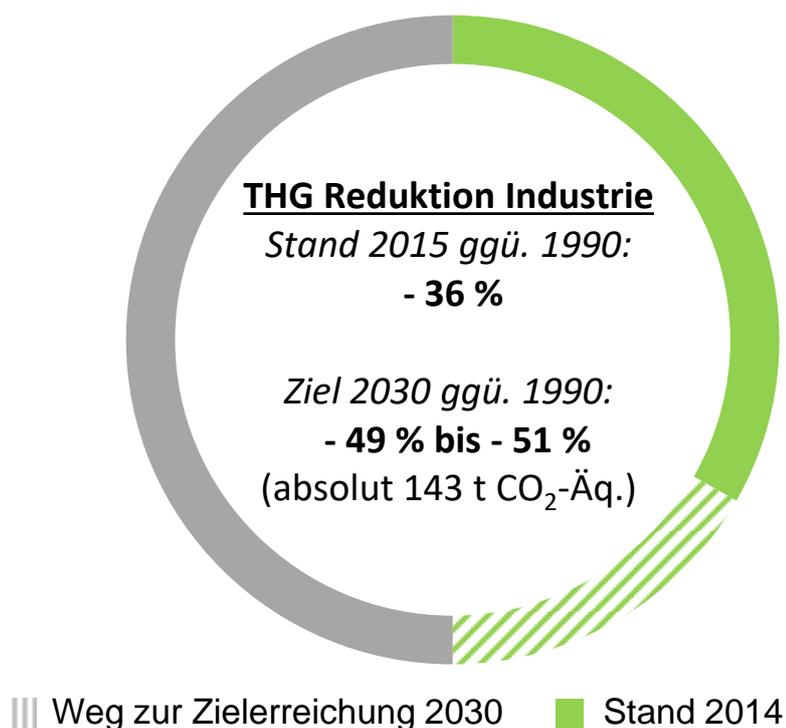


Abbildung 2-1: Status der Zielerreichung für die Verminderung der THG-Emissionen im Industriesektor [12], [13]

Die sektoralen Ziele des Klimaschutzplans adressieren die direkten Emissionen in den Endenergiesektoren. Dies hat zur Folge, dass die Emissionen aus der Nutzung von

Strom den Endenergiesektoren nicht zugeteilt werden und die Reduktion dieser Emissionen nicht in den Zielen erfasst ist.<sup>2</sup>

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind bis 2015 gegenüber 1990 um 36 % gesunken. Die vorliegenden Zahlen für 2015 zeigen, dass zur Zielerreichung im Industriesektor weiterhin Handlungsbedarf besteht. [14]

## 2.2 Energie- und Emissionseinsparungen

Als Grundlage für die Ermittlung des Forschungsbedarfs in der Industrie dient der Abgleich des Status Quo (Kapitel 1) mit den sektorspezifischen Klimazielen (Kapitel 2.1) und der voraussichtlichen Entwicklung des Sektors (Kapitel 1.3). Zur Abschätzung der Entwicklungen des Endenergieverbrauchs und der THG-Emissionen im Industriesektor werden die im Anhang in Tabelle 6-2 gezeigten Szenarien untersucht.<sup>3</sup>

Die Szenarien betrachten mindestens einen Zeithorizont bis 2050. Die Zielszenarien gehen von einer Emissionsminderung zwischen 80 % und 95 % aus.

Die Studien unterscheiden sich u. a. in Bezug auf die Annahmen, die für die Parameter Bruttoinlandsprodukt, Bevölkerungs- und Beschäftigungsentwicklung getroffen wurden (s. Abbildung 2-2).

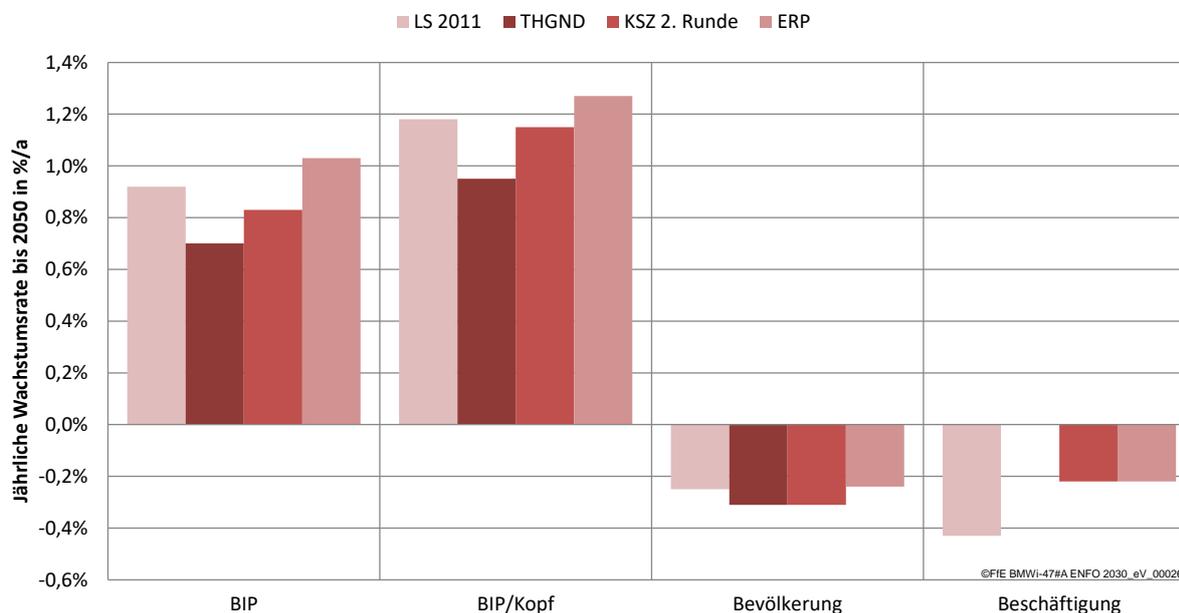


Abbildung 2-2: Rahmendaten der betrachteten Studien [15]

<sup>2</sup> Die Elektrifizierung industrieller Prozesswärme würde gemäß dieser Logik zu einer Emissionsreduktion im Industriesektor führen. Der resultierende Mehrstrombedarf, der im Bereitstellungssektor ggf. zu einer Erhöhung der Emissionen führt, da ein emissionsintensiveres Kraftwerk in den Markt drängt, wird dem Industriesektor folglich nicht zur Last gelegt.

<sup>3</sup> Details zu den Szenarien sind dem ausführlichen Studienvergleich in [15] zu entnehmen.

Alle Studien gehen von einem Anstieg des Wirtschaftswachstums aus, das zwischen  $\sim 0,7\%$ /a („THGND“) und  $\sim 1,0\%$ /a („ERP“) zunimmt. Hinsichtlich der Bevölkerungsdichte ist gemäß allen Studien ein Rückgang um ca.  $0,2\%$ /a zu verzeichnen. Gleiches gilt für die Anzahl der Beschäftigten, die in der Leitstudie 2011 am schnellsten abnimmt und auf die Alterung der Gesellschaft in Deutschland zurückzuführen ist. Die Klimaschutzenszenarien und das Szenario „ERP-Ziel“ verweisen auf eine deutlich höhere Zunahme der Wohnfläche als die Leitstudie und das „THGND-Szenario“.

Zudem werden die Preisentwicklungen für Erdöl, Erdgas und Steinkohle in den Studien unterschieden. Dabei gehen alle Studien von einem Anstieg der Energieträgerpreise aus. Die verzeichneten Zunahmen weichen jedoch aufgrund der Unsicherheit bezüglich der Entwicklung der Brennstoffmärkte stark voneinander ab. Für die Preisentwicklung der europäischen Emissionszertifikate ist bei allen Studien ein deutlicher Anstieg prognostiziert. Im Jahr 2050 werden Werte zwischen  $46 \text{ EUR}_{2010}/\text{tCO}_2$  und  $200 \text{ EUR}_{2010}/\text{tCO}_2$  erwartet. [15] Zudem wird angenommen, dass ab 2025 die Carbon Capture and Storage (CCS) Technologie zur Verfügung steht und die Biomassenutzung in allen Szenarien, wenn auch in sehr unterschiedlichen Ausmaßen, zunimmt [16].

Das Klimaschutzenszenario berücksichtigt neben den o. g. Rahmenbedingungen eine Verdopplung des Erdgaspreises bis 2050 und eine 2,5-fache Erhöhung des Rohölpreises. Die anderen Szenarien gehen von einer Zunahme von 80 % bis 95 % der Grenzübergangspreise für fossile Energieträger aus. Die Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ beinhaltet wenige ökonomische Rahmenbedingungen und dient als technologieorientierte Machbarkeitsstudie, bei der keine Kosten aufgeführt werden.

### 2.2.1 Endenergie

In diesem Abschnitt werden die untersuchten Studien in Bezug zu der Entwicklung des Endenergiebedarfs und der zugrundeliegenden Annahmen analysiert. Abbildung 2-3 zeigt den einzusparenden Endenergiebedarf je Szenario und Endenergiesektor.

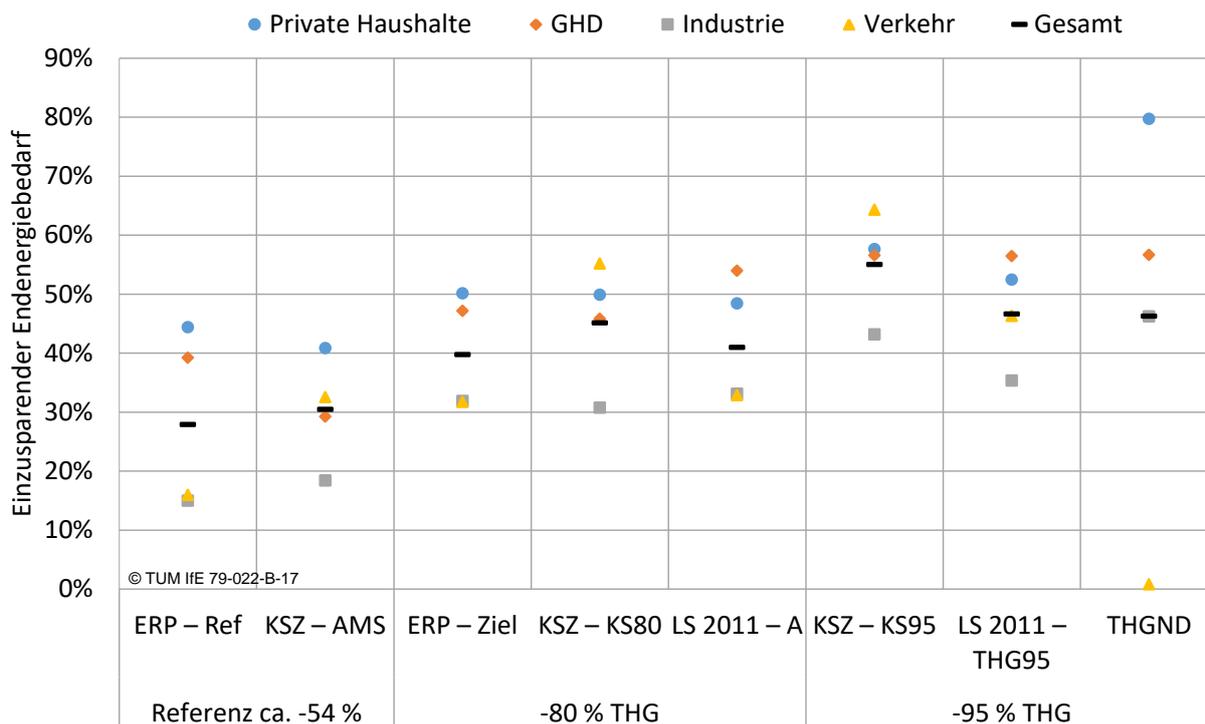


Abbildung 2-3: Sektorale Aufteilung des einzusparenden Endenergiebedarfs [15].

Für den Industriesektor liegen die für die Zielerreichung erforderlichen Einsparungen zwischen ~ 31 % (Ziel - 80 % THG) und ~ 46 % (Ziel - 95 % THG). Die zur Zielerreichung notwendigen Einsparungen liegen, im Vergleich zu den Einsparungen aus den Referenzszenarien „ERP – Ref“ und „KSZ – AMS“, um den Faktor zwei bis drei darüber. Nachfolgend wird anhand exemplarischer Vergleiche gezeigt, wie sich die verschiedenen Szenarien in Bezug zu den umgesetzten Maßnahmen unterscheiden.

**Exemplarischer Vergleich Referenz- und Zielszenario: „KSZ-AMS“ und „KSZ-KS80“**

Das Zielszenario „KS80“ weist einen 15 % geringeren Endenergieverbrauch gegenüber dem Referenzszenario „KSZ-AMS“ auf (~ - 31 % ggü. 2010). Dies ist v. a. auf die starke Reduktion der Nutzung der fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl zurückzuführen. Der Anteil der Erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch des Industriesektors im Jahr 2050 steigt von 2,5 % in „KSZ-AMS“ auf 22 % in „KSZ-KS80“. In beiden Szenarien steigt der Anteil des Stroms am Endenergieverbrauch. Der absolute Stromverbrauch bleibt jedoch im „KSZ-AMS“ nahezu konstant und sinkt im „KSZ-KS80“ um ca. 40 TWh gegenüber 2010.

Der Rückgang beim Stromverbrauch wird durch den Einsatz effizienterer Querschnittstechnologien (z. B. Elektromotorsysteme) erreicht. Der Brennstoffbedarf nimmt vor allem in den energieintensiven Branchen ab, da es zu einer Substitution fossiler Energieträger kommt. Besonders deutlich ist der Rückgang in der Metallerzeugung zu beobachten, da hier zunehmend eine Umstellung von Oxygen- auf Elektrostahl erfolgt. Der Brennstoff-

wechsel wird im „KSZ-KS80“ durch eine Erhöhung der Preise für CO<sub>2</sub>-Zertifikate angeleitet. In den nicht am Emissionshandel teilnehmenden Branchen wird von der Einführung einer „CO<sub>2</sub>-Steuer“ ausgegangen. Nichtsdestotrotz werden in dem Szenario die Potenziale für den Brennstoffwechsel und für Energieeffizienzmaßnahmen im Niedertemperaturbereich nicht vollständig ausgeschöpft. Eine weitere Maßnahme, die zu dem Rückgang des Endenergiebedarfs führt, ist die Steigerung der Abwärmenutzung durch Wärmepumpen von 5 % auf 15 % bis zu einem Temperaturbereich von ca. 80° C.

### **Exemplarischer Vergleich Zielszenario „- 80 % CO<sub>2</sub>“ und „- 95 % CO<sub>2</sub>“: „KSZ-KS80“ und „KSZ-KS95“ [17]**

Im „KS95“ ist von einer Verringerung des Endenergieverbrauchs von knapp 18 % gegenüber „KS80“ auszugehen (~ - 43 % ggü. 2010). In diesem Szenario wird Heizöl als Energieträger vollständig ersetzt und Kohle wird ausschließlich für die Reduktion des restlichen Anteils an Oxygenstahl verwendet. Der Brennstoffbedarf ist im Allgemeinen deutlich geringer als im „KS80“, was auf die Steigerung im Bereich der Materialeffizienz und auf die zunehmende Nutzung von Abwärme zurückzuführen ist. Dies geschieht vor allem in Branchen mit Prozesswärmebedarf im Niedertemperaturbereich in Kombination mit Wärmepumpen. Die Abwärmenutzung ist im „KS95“ auf 40 % gestiegen (bis 140 °C) [17]. Den Unternehmen wird zudem eine erhöhte Akzeptanz gegenüber längeren Amortisationszeiten für Effizienzmaßnahmen unterstellt. Der Strombedarf nimmt im Vergleich zum „KSZ-KS80“ moderat ab, da ein Großteil der Einsparpotenziale diesbezüglich ebenfalls ausgeschöpft ist.

#### **2.2.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Die ausgewerteten Szenarien der Studie „sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050“ deuten darauf hin, dass die deutsche Industrie stark gefordert sein wird, um durch innovative Vorsprünge die angestrebte THG-Vermindering zu erzielen. Abbildung 2-4 zeigt, dass die Emissionsminderungen für den Industriesektor in den Szenarien zwischen 55 und 103 % liegen.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Die Emissionsminderung von über 100 % ist auf die negativen Emissionen der Biomassennutzung als CCS bei Biogasanlagen zurückzuführen.

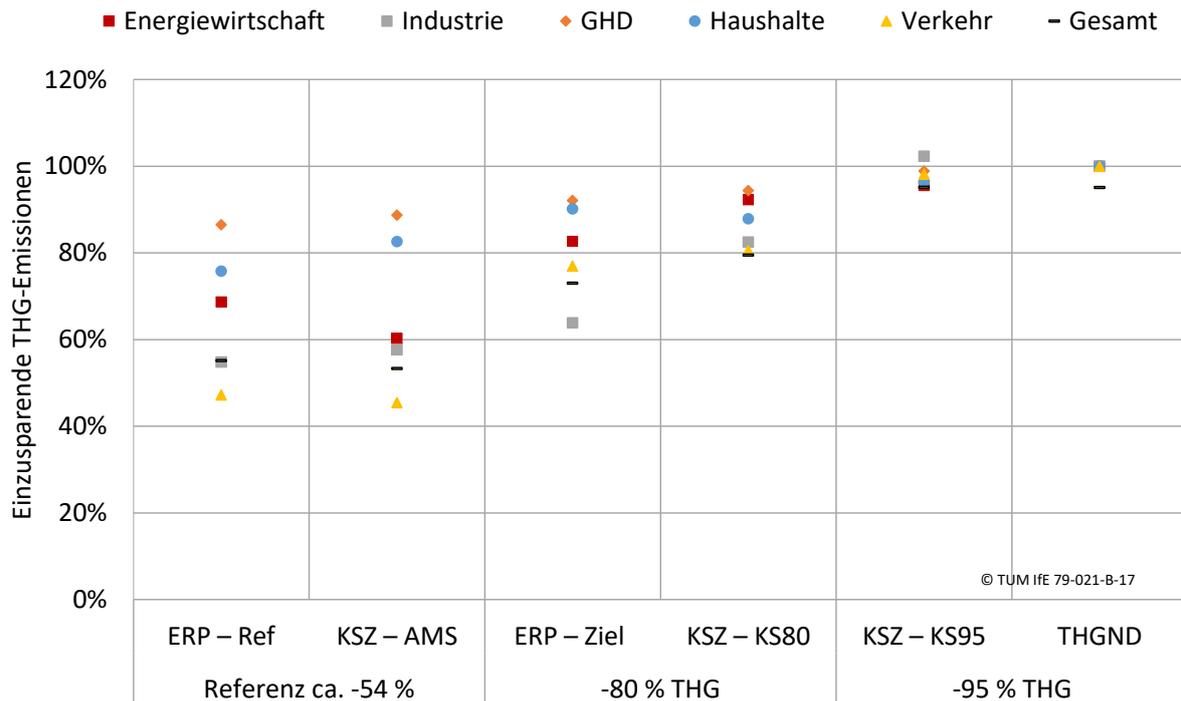


Abbildung 2-4: Sektorale Aufteilung der einzusparenden THG-Emissionen in 2050 [15]

Die Analyse der getroffenen Annahmen zeigt, dass neben Steigerungen bei Energie- und Materialeffizienz auch der Wechsel von Verfahrensrouten in der Grundstoffindustrie zur Verminderung der Emissionen beiträgt.

### Analyse ausgewählter Annahmen

- Die Stahlproduktion verzeichnet gemäß „AMS“ und „KS80“ bis zum Jahr 2050 einen Rückgang um 28 % verglichen mit dem Jahr 2010. „KS95“ geht dabei sogar von einem Rückgang von 38 % aus. Die drei Studien haben dafür den Anstieg des Elektrostahlanteils an der gesamten Stahlproduktion von 30 % (Jahr 2010) auf 45 % (Jahr 2050) gemein. Unterschieden wird lediglich die Geschwindigkeit des Produktionswandels, der bei „KS95“ im Jahr 2030 bei bereits 42 % (Vgl. 39 % bei „AMS“ und „KS80“) liegen muss. Durch die Verschiebung von Primärstahl zu Sekundärstahl erfolgt eine Emissionsminderung, da der eingesetzte Strom nahezu emissionsfrei ist.
- Die Szenarien „AMS“ und „KS80“ beschreiben eine Zunahme der Aluminiumproduktion um 19 % bis 2050, das „KS95“-Szenario hingegen um 16 %. Zudem steigt der Anteil von Sekundäraluminium von 60 % (Jahr 2010) in den Szenarien „AMS“ und „KS80“ auf 65 % (Jahr 2030) und 73 % (Jahr 2050). Im „KS95“ steigt der Sekundäraluminiumanteil an der gesamten Aluminiumproduktion auf 68 % (Jahr 2030) und 77 % (Jahr 2050). Dies hat zwar zunächst einen Rückgang des

Endenergiebedarfs und des Kohlenstoffeinsatzes zur Folge, dieser wird jedoch durch die Produktionssteigerung relativiert.

Aus dem Studienvergleich lässt sich u. a. ableiten, dass mit Blick auf 2050 die Substitution fossiler Energieträger und damit häufig auch die Substitution von Verfahrensrouten an Bedeutung zunehmen. Bis 2030 werden in erster Linie Energieeffizienzpotenzial bei Querschnitts- und Prozesstechnologien realisiert. Dies impliziert, dass v. a. zum Thema Energieträgerwechsel in der industriellen Prozesswärme noch Forschungsbedarf existiert, da bisher in diesen Studien keine schlüsselfertigen Lösungen bis 2030 implementiert werden.

### 3 Forschungsbedarf – relevante Maßnahmen zur Zielerreichung im Sektor

In diesem Abschnitt wird der Forschungsbedarf für die Industrie ausgewiesen. Die folgenden neun Maßnahmen wurden identifiziert:

- Intelligentes Power-to-Heat
- Erneuerbare Brennstoffe
- Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien
- Steigerung der Energieeffizienz
- Systemfreundliche Eigenerzeugung
- Solarthermie für Prozesswärme
- CCU – Carbon Capture and Utilization
- Nutzung industrieller Abwärme
- Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

#### 3.1 Intelligentes Power-to-Heat

Über die Hälfte (~ 60 %) der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Industriesektor sind auf die Bereitstellung von Wärme (Warmwasser und Raum- und Prozesswärme) zurückzuführen. Eine nahezu vollständige Verminderung des THG-Ausstoßes erfordert die Substitution fossilen Endenergiebedarfes durch emissionsfrei produzierten Strom und/oder erneuerbare Brennstoffe. Die Maßnahme „Intelligentes Power-to-Heat“ adressiert den Forschungsbedarf der in Zusammenhang mit der Substitution fossiler Energieträger durch Strom zur Bereitstellung industrieller Wärme steht. Hierbei steht unter anderem die Frage im Vordergrund, ob eine Hybridisierung der Wärmebereitstellung im Gegensatz zu einer reinen Elektrifizierung systemisch sinnvoller ist.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Hybridisierung = Strom und Brennstoffe können zur Wärmebereitstellung genutzt werden.

Tabelle 3-1: Forschungsbedarf zur Maßnahme „Intelligentes Power-to-Heat“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Ermittlung des Potenzials, das Power-to-Heat (und die Hybridisierung der Wärmebereitstellung) zur Integration erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien und zur Treibhausgasverminderung liefern kann [18], [19], [20].	X				X
Ermittlung der technischen Möglichkeiten zur Hybridisierung industrieller Prozesse [18], [21].		X	X		X
Einbindung von Power-to-Heat im Hochtemperatur-Bereich (z. B. induktiver Drehrohrofen in der Zementindustrie) [18], [19].		X	X	X	X
Erforschung und Umsetzung von Möglichkeiten zum Abbau von Hemmnissen bzgl. der Umsetzung von Power-to-Heat Lösungen [21].				X	
Untersuchung von Möglichkeiten zur Anpassung der Abgabe- und Umlagestruktur der Energieträgerpreise, um die Nutzung von Strom nicht zu benachteiligen [22].			X	X	
Identifikation der Systemrückwirkungen von Power-to-Heat-Maßnahmen und die Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit [21], [19], [20].		X	X		X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.2 Erneuerbare Brennstoffe

Die Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Brennstoffe<sup>6</sup> zur Bereitstellung industrieller Wärme stellt eine weitere Möglichkeit zur THG-Verminderung in der Industrie dar. Es gilt u. a. zu erforschen, in welchem Umfang der Einsatz erneuerbarer Brennstoffe in der Industrie technisch möglich ist und welche systemischen Chancen und Risiken die Nutzung erneuerbarer Brennstoffe mit sich bringen.

Tabelle 3-2: Forschungsbedarf zur Maßnahme „Erneuerbare Brennstoffe“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Ermittlung des Potenzials zur Nutzung erneuerbarer Brennstoffe in industriellen Prozessen (energetische und stoffliche Nutzung) [23], [19].	x	x	x		x
Erforschung der Potenziale der erneuerbaren Brennstoffproduktion als Senke für prozessbedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen in der Industrie [24].	x	x			
Lebenszyklusanalyse und Ermittlung der Kosten (System und Akteur) für erneuerbare Brennstoffnutzung in industriellen Anwendungen [23].	x		x		
Ermittlung und Senkung der Umrüstkosten, die für die Nutzung eines erneuerbaren Brennstoffes anfallen (Einzelfallanalysen) [19].		x	x		
Erhöhung der Akzeptanz für eine erneuerbare Brennstofflösung, die ggf. neue Importabhängigkeiten mit sich bringt [25].	x		x	x	x

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

<sup>6</sup> „Erneuerbare Brennstoffe sind Brennstoffe, die aus Erneuerbaren Energien wie Biomasse oder regenerativ erzeugtem Strom hergestellt werden.“ [23]

### 3.3 Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien und Prozesse

Die Flexibilisierung industrieller Lasten könnte im Energiesystem der Zukunft sowohl die Integration erneuerbar erzeugten Stroms fördern, als auch im Falle einer Dunkelflaute zur Erhöhung der Systemsicherheit beitragen. Obwohl bereits zahlreiche Studien zum Thema Lastflexibilisierung in der Industrie veröffentlicht wurden, herrscht in diesem Bereich nach wie vor ein hoher Forschungsbedarf.

Tabelle 3-3: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien und Prozesse"

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Ermittlung des Potenzials zur Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien und Prozesse [26], [27], [28].	x	x			
Ermittlung der Kosten für die Flexibilisierung industrieller Lasten und Vergleich mit anderen Flexibilitätsoptionen für die Industrie [29].			x		
Erlösmöglichkeiten für Flexibilitäten in der Industrie (Stichwort Flexibilitätsmarkt) [30].			x	x	
Identifikation von „Flexibilitätsperspektiven“ <sup>7</sup> in industriellen Prozessen [31], [27].		x			
Erforschung von Möglichkeiten zum Abbau von Hemmnissen bzgl. der Umsetzung bei der Flexibilisierung industrieller Anlagen (z. B. Aufklärung durch Informationskampagnen) [28].				x	
Bestimmung des Beitrags, den ein „flexibilisierter“ Industriesektor zur Versorgungssicherheit leisten kann (insbesondere im Falle einer Dunkelflaute) [31].	x				x

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

<sup>7</sup> „Flexibilitätsperspektiven (...) bezeichnen zukünftige Potenziale, die erst durch technische Eingriffe am Prozess umgesetzt werden können.“ [31]

### **3.4 Steigerung der Energieeffizienz**

Ein auf 100 % Erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem ist ohne eine maßgebliche Steigerung der Energieeffizienz, vor allem in der Industrie, nicht möglich. Dies liegt vor allem daran, dass die Bereitstellung Erneuerbarer Energien in Deutschland limitiert ist. Vor dem Hintergrund, dass in Zukunft fossile Energieträger durch erneuerbare Brennstoffe substituiert oder fossil befeuerte Prozesse elektrifiziert werden, ist ein hoher Zubaubedarf an erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien zu erwarten. Sowohl aufgrund von Akzeptanzproblemen als auch begrenzter Flächen ist das Ausbaupotenzial von Erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien in Deutschland jedoch begrenzt. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Stromnachfrage aufgrund verstärkter Sektorkopplung sollte der Grundsatz „Efficiency First“ konsequent verfolgt werden, um den Zubaubedarf an erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien auf einem handhabbaren Niveau zu halten. Vor diesem Hintergrund ergeben sich diverse Forschungsfragen zum Thema „Energieeffizienz in der Industrie.“ [32], [33]

Tabelle 3-4: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Steigerung der Energieeffizienz"

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Ermittlung des Potenzials für Energieeffizienzsteigerungen bei industriellen Prozessen und Querschnittstechnologien [33].	x	x	x		x
Entwicklung neuer Methoden der Investitionsbewertung für Energieeffizienzmaßnahmen (z.B. Ausrichtung von Investitionen am Kapitalwert und nicht Cash-Flow basiert) [34].			x	x	
Erforschung der Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz von Querschnittstechnologien (inkl. Erforschung der Möglichkeiten zur Einbindung neuer Querschnittstechnologien wie additiver Fertigungstechniken in existierende Produktionsprozesse) [35].		x	x		
Erforschung der Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz von Prozesstechnologien (z. B. effizientere Refiner in der Papierindustrie) sowie Möglichkeiten zur Substitution bisheriger Verfahren durch effizientere Alternativen (z. B. Direktreduktion von Eisen mittels Wasserstoff) [33].		x	x		
Möglichkeiten zur Aufklärung über mögliche Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb der Betriebe (z. B. Sensibilisierung der Mitarbeiter) [34].			x	x	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.5 Systemfreundliche Eigenerzeugung

Im Jahr 2015 betrug die industrie eigene Nettostromerzeugung ca. 54 TWh (ca. 30 Mio. tCO<sub>2</sub>) [35], [5]. Die Stromeigenerzeugung ist somit für ca. 10 % der Emissionen der gesamten deutschen Stromerzeugung verantwortlich. Industrieunternehmen betreiben u. a. aus Gründen der Versorgungssicherheit eigene Kraftwerke. Eine vollständige Umstellung der Eigenerzeugung auf dargebotsabhängige Erneuerbare Erzeugungstechnologien wird sich folglich als schwierig erweisen. Es gilt zu erforschen, welche Möglichkeiten zur Nutzung Erneuerbarer Energien für die Eigenerzeugung existieren

und wie existierende Kraftwerke systemdienlich (z. B. Flexibilisierung der Nachfrage) eingesetzt werden können.

Tabelle 3-5: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Systemfreundliche Eigenerzeugung"

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Ermittlung des Potenzials für den Einsatz Erneuerbarer Energien in der industriellen Eigenerzeugung von Strom und Wärme [36].		x	x		
Ermittlung von Rahmenbedingungen, die eine erneuerbare und flexible industrielle Strom- und Wärmeproduktion fördern (z. B. Förderung green image) [36].			x	x	
Erforschung von Möglichkeiten zur emissionsfreien Produktion von Strom- und Wärme in der Industrie unter Beibehaltung höchster Ansprüche an die Versorgungssicherheit [36].		x			x
Analyse der Systemrückwirkung bei zunehmender Anbindung der Industrie an das Netz der öffentlichen Versorgung (Eigenerzeugung vs. Anbindung an das Stromnetz) [36].	x	x	x	x	x

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.6 Solarthermie für Prozesswärme

Etwas mehr als 55 % der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Industrie entstehen durch die Erzeugung industrieller Prozesswärme. Neben dem Einsatz von Erneuerbaren Brennstoffen, der Elektrifizierung sowie der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, stellt die Nutzung von Solarthermie eine Möglichkeit zur Emissionsverminderung dar. Dabei bietet sich die direkte Nutzung von Erneuerbaren Energien vor allem zur Bereitstellung von Prozesswärme für geringe Temperaturniveaus an (< 120 °C).

Tabelle 3-6: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Solarthermie für Prozesswärme"

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Standardisierung des Planungs- und Projektablaufs zur Senkung der Kosten und verbessertem Projektablauf, bei der Nutzung von Solarthermie für Prozesswärme [37].		x	x		
Detaillierte Untersuchungen zur Integration solarthermischer Anlagen in den Produktionsablauf mit dem Ziel Branchenkonzepte zu entwickeln [37].		x			
Entwicklung von Mitteltemperaturkollektoren (100° C bis 250° C) [37].				x	
Innerbetriebliche Aufklärung über Möglichkeiten solarer Prozesswärmenutzung (Kollektoren, Speicher, Einbindung) [37].					
Pilot- und Demonstrationsanlagen als Referenzobjekte für die relevanten Branchen [37].		x		x	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.7 CCU – Carbon Capture and Utilization

Durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung (engl. Carbon capture and utilization (CCU)) können die CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Anlagen drastisch vermindert werden. Im Zusammenhang mit der Anwendung von CCU existieren jedoch eine Reihe ungeklärter technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Fragen.

Tabelle 3-7: Forschungsbedarf zur Maßnahme "CCU - Carbon Capture and Utilization"

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Ermittlung von aktuellen und zukünftigen CO <sub>2</sub> -Abscheidungs- und Verwertungspotenzialen [38].	x	x			
Einbeziehung nachgelagerter Prozesse in die Lebenszyklusanalyse der CCU-Produkte [39].	x				
Erforschung von Möglichkeiten zur Erhöhung der Effizienz der CO <sub>2</sub> -Abscheidung (Grundlagenforschung & deren Weiterentwicklung) [39].		x	x		
Wirtschaftliche Möglichkeiten zur großtechnischen Umsetzung, Verfahrensentwicklung [38].		x	x	x	
Erstellung quantitativer Analysen bzgl. gesundheitsgefährdender Schadstoffe bei der Abspaltung (Aminwäsche) von CO <sub>2</sub> [39].	x			x	
Akzeptanz der Industrie und der Konsumenten von CCU und CCU Produkten [39].				x	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.8 Nutzung industrieller Abwärme

Die Bereitstellung industrieller Prozesswärme verursacht ca. 19 % der gesamten energiebedingten Emissionen in Deutschland. Durch sinnvolle Nutzung von Abwärme werden Wärmeverluste reduziert und somit der Energiebedarf und letztlich die Emissionen für die Prozesswärmebereitstellung gesenkt. Zudem wird der Kühlbedarf für Abwärmeströme gesenkt.

Tabelle 3-8: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Nutzung industrieller Abwärme"

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Entwicklung branchenspezifischer Abwärmenutzungskonzepte zur Steigerung der Abwärmenutzung [40].		x			
Erforschung von Möglichkeiten zur Anpassung der Rahmenbedingungen der Energiegesetze (KWKG, EnEG, EWärmeGG, EEG) zur Beseitigung von Wirtschaftlichkeitshemmnissen bei der Abwärmenutzung [40].			x	x	
Möglichkeiten zur standardisierten Integration von Organic Rankine Cycle (ORC)-Prozessen in energieintensive Anlagen [41].	x	x			
Nutzbarmachung niedriger Temperaturniveaus zur Verstromung (< 100 °C) [41].					
Thermoelektrische Generatoren (TEG): Erhöhung Wirkungsgrad, Wirtschaftlichkeit [41].		x	x		
Weiterentwicklung von Latentwärmespeichern (Phasenwechsel Wasser/Eis) für großtechnische Anwendungen [42].					

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.9 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung in der Industrie

Durch Kombination einer klassischen Kraft-Wärme-Kopplungsanlage mit einer thermischen Kältemaschine kann Strom, Wärme und Kälte in einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlage (KWKK) erzeugt werden. Für viele Industrieprozesse existiert Strom-, Wärme- und Kältebedarf, der durch eine KWKK Anlage effizient gedeckt werden kann. Die Nutzung von KWKK Anlagen kann somit zur Emissionsreduktion bei der Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung in der Industrie beitragen.

Tabelle 3-9: Forschungsbedarf zur Maßnahme "KWKK"

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Entwicklung branchenspezifischer Nutzungskonzepte für den geeigneten Einsatz von KWKK-Systemen [40].		x	x		
Aufbereitung verschiedener Konzepte für dezentrale KWKK im kleinen Kälteleistungsbereich (variable Abwärmtemperatur) [43].		x	x		
Erforschung neuer Verfahren zur thermischen Kälteerzeugung [43].		x	x		
Möglichkeiten zu Steigerung der Effizienz von Sorptionskältemaschinen (Material- und Komponentenentwicklung) [43].	x	x			
Weiterentwicklung direkt luftgekühlter Sorptionskältemaschinen und intelligenter Rückkühlsysteme (Reduzierung Anlagenaufwand → Platz-, Energieeinsparung) [44].		x	x	x	
Aufklärung der Anlagenbetreiber und Planer über verfügbare Technologien, keine Standardlösungen [44].				x	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte

**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

## 4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms

In diesem Abschnitt wird der Forschungsbedarf aus Kapitel 3 mit dem 6. Energieforschungsprogramm abgeglichen. Ziel ist es, Gemeinsamkeiten und Unterschiede in Punkto Forschungsförderung in der Industrie aufzudecken.

### 4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen

Nachfolgend werden die im 6. EFP aufgeführten und für den Industriesektor relevanten Themengebiete komprimiert gelistet. Der Großteil der Forschungsbedarfe betrifft Energieeffizienzmaßnahmen in der Industrie. Die dazugehörige Kennzeichnung im 6. EFP befindet sich in Klammern dahinter.

- Flexibilität, Effizienz und Wirtschaftlichkeit industrieller Eigenerzeugung und von Industrieprozessen (3.6.1)
- CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus Industrieprozessen (3.6.3)
- Integration von Brennstoffzellen in das Energieversorgungssystem – Technologiespezifische Fragen der Integration von Brennstoffzellen in Industrieanlagen (3.7.7)
- Energieeffizienz in der Industrie (3.12)
  - Innovative Entwicklungen für Thermoprozesse (3.12.1)
  - Effizientere Techniken zur Nutzung industrieller Abwärme (3.12.2)
  - Solare Prozesswärme (3.12.3)
  - Innovationen bei der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik zur Optimierung von Prozessen und Fertigungsverfahren (3.12.4)
  - Neue Technologien zur Reduktion des Energieeinsatzes bei mechanischen, thermischen und physikalisch chemischen Trennverfahren (3.12.5)
  - Neue Technologien zur Bereitstellung von Kälte und Wärme auf der Basis FCKW-freier und besonders energieeffizienter Systeme (3.12.6)
  - Entwicklung neuer Technologien zur rationellen Stromnutzung (3.12.7)
  - Neue Technologien der Hochtemperatursupraleitung (HTSL) für die Energietechnik (3.12.8)
  - Materialeffizienz energieintensiver Rohstoffe sowie industrieller Ausgangsstoffe und Zwischenverbindungen (3.12.9)
  - Antriebstechnik und mechanische Kraftübertragung (3.12.10)

- Energieeffiziente chemische Prozesstechnik (3.12.11)
- Energieeffiziente Fertigungstechnik (3.12.12)
- Energieeffiziente Reststoff- und Abfallbehandlung/-verwertung (3.12.13)
- Energieeffiziente Wasserbehandlung (3.12.14)
- Querschnittstechnologien (3.12.15)

## **4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs**

Der Vergleich zwischen den Abschnitten 3 und 4.1 zeigt, dass der hier identifizierte Forschungsbedarf alle Themen des 6. EFP beinhaltet und darüber hinaus die Maßnahmen Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien und Prozesse, Intelligentes Power-to-Heat und Erneuerbare Brennstoffe thematisiert. Dies sind in erster Linie Maßnahmen, die mit dem Wechsel von Verfahrensrouten oder Anpassungen an Industrieprozessen in Verbindung stehen. Die Szenarioanalyse in Kapitel 2.2 zeigt, dass diese Maßnahmen zwischen 2030 und 2050 eine entscheidende Rolle bei der Reduzierung der THG-Emissionen des Industriesektors einnehmen. Es ist folglich dringend notwendig, dass diese Maßnahmen im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms berücksichtigt werden. Hinzu kommen regulatorische Themen sowie die Akzeptanzforschung im Zusammenhang mit Industriethemen. Diese werden ebenfalls im 6. EFP nicht adressiert, werden jedoch auf absehbare Zeit eine wichtige Rolle bei der Umsetzung von treibhausgasvermindernden Maßnahmen in der Industrie einnehmen.

## 5 Fazit

Aufgrund der Bedeutung des produzierenden Gewerbes für die deutsche Volkswirtschaft darf die Umsetzung von Maßnahmen zur Treibhausgasverminderung deren Wettbewerbsfähigkeit nicht beeinträchtigen. Die Analysen in diesem Sektorsteckbrief ergeben jedoch, dass die Erfüllung der Pariser Klimaschutzziele nur durch eine signifikante Verminderung des Treibhausgasausstoßes im Industriesektor möglich ist. Diese wiederum kann nicht durch die bloße Umsetzung von Effizienzverbesserungen erreicht werden (s. Kapitel 2.2). Sowohl technische Anpassungen an den Produktionsprozessen (z. B. Substitution von Energieträgern) als auch der Wechsel von Verfahrensrouten (z. B. Primärstahl- zu Sekundärstahl) werden benötigt, um die Ziele im Industriesektor zu erreichen. Das 6. EFP hat eine Bandbreite an Forschungsthemen mit Bezug zur Verbesserung der Energieeffizienz von Industrieprozessen aufgeworfen. Der vorliegende Sektorsteckbrief zeigt, dass Themen, welche die Substitution von fossilen Brennstoffen betreffen, bisher zu wenig Beachtung gefunden haben, jedoch für die Energiewende in der Industrie von zentraler Bedeutung sind. Im 7. EFP sollte folglich zusätzlich zu dem Thema „Energieeffizienz in der Industrie“ auch das Thema „Energieträgerwechsel in der Industrie“ platziert werden. Neben der Beantwortung technischer Fragestellung sollten regulatorische Themen und die Akzeptanzforschung zudem in Zukunft stärkere Beachtung finden.

## 6 Anhang

Tabelle 6-1: Klassifikation der Wirtschaftszweige nach DESTATIS

Nr.	Wirtschaftszweig	Nr. der Klassifizierung nach WZ 2008
1	Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau	08 Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau
2	Ernährung und Tabak	10 Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln 11 Getränkeherstellung 12 Tabakverarbeitung
3	Papiergewerbe	17 Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus
4	Grundstoffchemie	20.1 Herstellung von chemischen Grundstoffen, Düngemitteln und Stickstoffverbindungen, Kunststoffen in Primärformen und synthetischem Kautschuk in Primärformen
5	Sonstige chemische Industrie	20 Herstellung von chemischen Erzeugnissen 21 Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen ohne 20.1 Herstellung von chemischen Grundstoffen, Düngemitteln und Stickstoffverbindungen, Kunststoffen in Primärformen und synthetischem Kautschuk in Primärformen
6	Gummi- und Kunststoffwaren	22 Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren
7	Glas u. Keramik	23.1 Herstellung von Glas und Glaswaren 23.2 Herstellung von feuerfesten keramischen Werkstoffen und Waren 23.31 Herstellung von keramischen Wand- und Bodenfliesen und –platten 23.4 Herstellung von sonstigen Porzellan- und keramischen Erzeugnissen
8	Verarbeitung von Steinen und Erden	23 Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden  ohne 23.1 Herstellung von Glas und Glaswaren ohne 23,2 Herstellung von feuerfesten keramischen Werkstoffen und Waren ohne 23.31 Herstellung von keramischen Wand- und Bodenfliesen und –platten ohne 23.4 Herstellung von sonstigen Porzellan- und keramischen Erzeugnissen
9	Metallerzeugung	24.1 Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen
10	NE-Metalle, Gießereien (Eisen-, Leicht- und Buntmetallgießereien)	24.4 Erzeugung und erste Bearbeitung von NE-Metallen 24.5 Gießereien

<b>11</b>	Metallbearbeitung	24.2 Herstellung von Stahlrohren, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücken aus Stahl 24.3 Sonstige erste Bearbeitung von Eisen und Stahl 25 Herstellung von Metallerzeugnissen
<b>12</b>	Maschinenbau	28 Maschinenbau ohne 28.23 Herstellung von Büromaschinen (ohne Datenverarbeitungsgeräte und periphere Geräte)
<b>13</b>	Fahrzeugbau	29 Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen 30 Sonstiger Fahrzeugbau
<b>14</b>	Sonstige Wirtschaftszweige	alle übrigen Nummern außer 05.1 Steinkohlenbergbau 05.2 Braunkohlenbergbau 06 Gewinnung von Erdöl und Erdgas 09 Erbringung von Dienstleistungen für den Bergbau und für die Gewinnung von Steinen und Erden 19.1 Kokerei 19.2 Mineralölverarbeitung

Tabelle 6-2: Untersuchte Energieszenarien mit Zielen und Abkürzungen [15]

Referenzszenarien	THG-Minderungsziel in 2050	Abkürzung
Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Referenzszenario, Trendszenario [45]	-	ERP-Ref
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Aktuelle Maßnahmen Szenario [17]	-	KSZ-AMS
<b>Zielszenarien</b>		
Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Zielszenario [45]	80% (1)	ERP-Ziel
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 80 [17]	80%	KSZ-KS80
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 95 [17]	95%	KSZ-KS95
Klimaschutzszenarien 1. Runde, Klimaschutzszenario 90 [46]	90%	KSZ-KS90
Leitstudie 2011, Szenario A [47]	80%	LS 2011-A
Leitstudie 2011, Szenario THG95 [47]	95% (2)	LS 2011-THG95
Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 [48]	95%	THGND

(1) nur energiebedingte Emissionen

(2) Ziel wird erst 2060 erreicht

Tabelle 6-3: Direkte und indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträger und Anwendungsart des Industriesektors in Mt für das Jahr 2015 [49]

	Mineralöl	Gas	Kohle	Strom	Fernwärme	Sonstige	Summe	Prozent
<b>Prozesswärme</b>	4.253.090	53.383.701	50.444.636	21.343.683	11.262.289	5.583.192	146.270.590	55%
<b>Mechanische Energie</b>	52.337	1.733.461	-	87.345.812	-	-	89.131.610	33%
<b>Raumwärme</b>	1.442.804	9.064.826	1.013.822	452.776	2.113.305	136.353	14.223.885	5%
<b>Beleuchtung</b>	-	-	-	5.619.689	-	-	5.619.689	2%
<b>IKT</b>	-	-	-	5.112.932	-	-	5.112.932	2%
<b>Prozesskälte</b>	-	-	-	2.669.257	-	-	2.669.257	1%
<b>Klimakälte</b>	-	-	-	2.645.786	-	-	2.645.786	1%
<b>Warmwasser</b>	110.503	694.266	77.648	34.678	161.856	10.443	1.089.394	0%
<b>Summe</b>	5.858.734	64.876.254	51.536.105	125.224.611	13.537.451	5.729.987	266.763.142	
<b>Prozent</b>	2%	24%	19%	47%	5%	2%		

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Endenergieverbrauch in Deutschland 2015 nach Endenergiesektoren und Aufteilung der Industrie nach Energieträgern in PJ [4] .....	4
Abbildung 1-2: Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen nach der Verursacherbilanz für Deutschland im Jahr 2015 in Mt CO <sub>2</sub> [4 – 7].....	5
Abbildung 1-3: Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen der Industrie nach Branchen im Jahr 2015 [4 – 7] /AGEB-02 17/. .....	6
Abbildung 1-4: Energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen der Industrie nach Anwendungsarten und Energieträgern [4 – 7].....	7
Abbildung 1-5: Aufteilung des Bruttoinlandprodukts auf die Sektoren in Deutschland [8]	8
Abbildung 2-1: Status der Zielerreichung für die Verminderung der THG-Emissionen im Industriesektor [12], [13].....	11
Abbildung 2-2: Rahmendaten der betrachteten Studien [15] .....	12
Abbildung 2-3: Sektorale Aufteilung des einzusparenden Endenergiebedarfs [15]. .....	14
Abbildung 2-4: Sektorale Aufteilung der einzusparenden THG-Emissionen in 2050 [15]	16

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Forschungsbedarf zur Maßnahme „Intelligentes Power-to-Heat“ .....	19
Tabelle 3-2: Forschungsbedarf zur Maßnahme „Erneuerbare Brennstoffe“ .....	20
Tabelle 3-3: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien und Prozesse" .....	21
Tabelle 3-4: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Steigerung der Energieeffizienz" .....	23
Tabelle 3-5: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Systemfreundliche Eigenerzeugung" .....	24
Tabelle 3-6: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Solarthermie für Prozesswärme" .....	25
Tabelle 3-7: Forschungsbedarf zur Maßnahme "CCU - Carbon Capture and Utilization" .....	26
Tabelle 3-8: Forschungsbedarf zur Maßnahme "Nutzung industrieller Abwärme" .....	27
Tabelle 3-9: Forschungsbedarf zur Maßnahme "KWKK" .....	28
Tabelle 6-1: Klassifikation der Wirtschaftszweige nach DESTATIS .....	32
Tabelle 6-2: Untersuchte Energieszenarien mit Zielen und Abkürzungen .....	33
Tabelle 6-3: Direkte und indirekte CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Energieträger und Anwendungsart des Industriesektors in Mt für das Jahr 2015 [49] .....	34

## Abkürzungsverzeichnis

BIP	Bruttoinlandsprodukt
CCS/U	Carbon Capture and Storage/Utilization
EE	Erneuerbare Energien
EFP	Energieforschungsprogramm
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
KSP/-Z	Klimaschutzplan/-szenarien
KW(K)K	Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung
ORC	Organic Rankine Cycle
THG	Treibhausgas

## Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2010
- [2] Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarb. Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden - Tabelle 2: Energieverbrauch nach Energieträgern, Deutschland, Berichtszeitraum: 2014 in: auf Anfrage erhalten. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis), 2015
- [3] Klassifikationen - Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008). Wiesbaden: Statistische Bundesamt, 2008
- [4] Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2015 - Stand: 28.02.2017. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2017
- [5] Rasch, M.; Regett, A.; Pichlmaier, S.; Conrad, J.; Greif, S.; Guminski, A.; Rouyrre, E.; Orthofer, C.; Zipperle, T.: Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz - Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems in: BWK Ausgabe 03/2017, S. 38-42. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2017
- [6] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2017
- [7] Produzierendes Gewerbe - Stromerzeugungsanlagen der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden 2015 in: Fachserie 4 Reihe 6.4. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2016
- [8] Statistisches Bundesamt: VGR der Länder - Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den Ländern - Reihe 1 Band 1 - 1991 bis 2016. Wiesbaden: statistisches Bundesamt, 2017
- [9] Glässer, Hellwart: Anteil der Industrie am BIP seit 20 Jahren nahezu konstant (Pressemitteilung vom 08.04.2015 - 124/15). Wiesbaden: statistisches Bundesamt, 2015
- [10] Hermann, Mario; Pentek, Tobias; Otto, Boris: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios - A Literature Review in: 49th Hawaii International Conference IEEE. Dortmund: Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management, 2016

- [11] Böhmer, Michael; Klose, Georg; Sachs, Andreas; Stinshoff, Clara; Weiss, Johann; Weinelt, Heidrun: Lage und Zukunft der deutschen Industrie (Perspektive 2030) - Endbericht (Projekt Nr. 19/15). München: Prognos AG, 2016
- [12] Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU), 2016
- [13] Gniffke, Patrick: Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen - 1990 - 2015. Dessau: Umweltbundesamt, 2017
- [14] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2015 - Stand: 10.08.2017. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2017
- [15] Haller, Markus Dr.; Repenning, Julia; Vogel, Moritz; Schломann, Barbara Dr.; Reuter, Matthias; Jochem, Eberhard Prof. Dr.; Reitze, Felix Dr.; Schön, Michael; Toro, Felipe Dr.: Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050. Berlin: Öko-Institut e.V., 2016
- [16] Wohlfahrt, Katharina; Schломann, Barbara; Jochem, Eberhard; Reitze, Felix; Schön, Michael; Toro, Felipe: Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie. Karlsruhe: Öko-Institut e.V., 2016
- [17] Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015
- [18] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Industrielles Power-to-Heat Potenzial in: Vortrag bei der IEWT 2015 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2015
- [19] Nilsson, Lars J.; Åhman, Max; Schneider, Clemens: Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification - Implications for future EU electricity demand in: Energy 115 (2016). Amsterdam: Elsevier Science, 2016
- [20] Lechtenböhmer, Stefan; Samadi, Sascha: The double challenge: Limiting electricity demand growth while pushing forward electrification of energy demand - lessons from recent low-carbon roadmaps and scenarios for the EU. Stockholm: ECEEE SUMMER STUDY PROCEEDINGS, 2013

- [21] Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Transition Towards an “All-electric World” - Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System in: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien, Österreich: Technische Universität Wien, 2017
- [22] Praetorius, Barbara; Lenck, Thorsten: Neue Preismodelle für Energie - Grundlagen einer Reform der Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom und fossile Energieträger. Berlin: Agora Energiewende, 2017
- [23] Köckhuber, Claudius; Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Die Grenzen der Elektrifizierung - Analyse und Bewertung von Green Fuels als Ergänzung zu Strom im dekarbonisierten Energiesystem in: et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen 67. Jg. (2017) Heft 8. Essen: etv Energieverlag GmbH, 2017
- [24] dena-Leitstudie - Integrierte Energiewende (Zwischenfazit). Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2017
- [25] Pfenning, Maximilian; Gerhardt, Norman et al.: 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 IWES, 2017
- [26] Langrock, Th.; Brühl, St.; Michels, A.: Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen. Düsseldorf: Energie-Agentur.NRW, 2016
- [27] Dufter, Christa; Guminski, Andrej; Orthofer, Clara; von Roon, Serafin; Gruber, Anna: Lastflexibilisierung in der Industrie – Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung in: Paper und Vortrag bei der IEWT 2017 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2017
- [28] Buber, Tim; Gruber, Anna; von Roon, Serafin; Hüneke, Marie; Klobasa, Marian; Angerer, Gerhard; Schleich, Joachim; Friedrichsen, Nele; Lüllmann, Arne: Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Berlin: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) 2013
- [29] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska: Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 - Teilbericht: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher - Lastflexibilisierung in Industrie und GHD. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2016

- [30] Elsner, Peter; Erlach, Berit; Fishedick, Manfred: Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050 - Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge. München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2015
- [31] Industrieprozesse - Kopernikus-Projekt SynErgie in: <https://www.kopernikusprojekte.de/projekte/industrieprozesse> (Abruf: 01.05.2017) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6qxi7wGzh>. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2016
- [32] Quaschnig, Volker: Sektorkopplung durch die Energiewende - Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Berlin: Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW), 2016
- [33] Lechtenböhrer, Stefan; Samadi, Sascha; Schneider, Clemens: Energy efficiency quo vadis? - The role of energy efficiency in a 100 % renewable future. Stockholm: ECEEE SUMMER STUDY PROCEEDINGS, 2017
- [34] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) – Bundesstelle für Energieeffizienz (BfEE): 2. Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan (NEEAP) der Bundesrepublik Deutschland. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2011
- [35] Statusreport - Additive Fertigungsverfahren. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2014
- [36] Bolay, Sebastian Dr.; Flechtner, Jakob; Otto, Christian: Faktenpapier Eigenerzeugung von Strom - Rahmenbedingungen, Trends, Beispiele. Hannover: Bundesverband der Energie-Abnehmer e.V., 2014
- [37] Lauterbach, C.; Schmitt, B.; Vajen, K.: Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland - Teil 1 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben "SO-PREN - Solare Prozesswärme und Energieeffizienz" Förderkennzeichen: 0329601T. Kassel: Institut für Thermische Energietechnik, 2011
- [38] Lehner, Markus; Ellersdorfer, Markus; Treimer, Robert; Moser, Peter; Theodoridou, Vassiliki; Biedermann, Hubert: Carbon Capture and Utilization (CCU) - Verfahrenswege und deren Bewertung. Graz: TU Graz, 2012
- [39] Olfe-Kräutlein, Barbara; Naims, Henriette; Bruhn, Thomas; Lorente Lafuente, Ana Maria: CO2 als Wertstoff - Herausforderungen und Potenziale für die Gesellschaft. Potsdam: Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), 2016

- [40] Grote, Lars; Hoffmann, Patrick; Tänzer, Guillem: Abwärmenutzung - Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge, Fassung 1.1. Saarbrücken: IZES gGmbH, 2015
- [41] Pehnt, Martin Dr.; Bödeker, Jan; Arens, Marlene; Jochem, Eberhard Prof. Dr.: Die Nutzung industrieller Abwärme - technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Heidelberg: ifeu, 2010
- [42] Meinert, Jens Prof. Dr.-Ing.: Technologien der Abwärmenutzung. Dresden: Sächsische Energieagentur - SEANA GmbH, 2016
- [43] Wietschel, Martin; Arens, Marlene; Doetsch, Christian; Herkel, Sebastian; Markewitz, Peter; Scheufen, Martin; Krewitt, Wolfram; Möst, Dominik: Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung - Technologiebericht in: ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale". Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2010
- [44] Heinrich, Carsten; Wittig, Sebastian; Albring, Peter; Richter, Lutz; Safarik, Matthias; Böhm, Ursula; Hantsch, Andreas: Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie in: Climate Change 25/2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2014
- [45] Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose - Projekt Nr. 57/12 - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie . Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2014.
- [46] Klimaschutzszenario 2050 - 1. Modellierungsrunde. Freiburg, Berlin: Öko-Institut e.V., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2014
- [47] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin: Bundesregierung, 2010
- [48] Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 2013
- [49] Rohde, Clemens: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2015 mit Aktualisierung der Anwendungsbilanzen der Jahre 2009 bis 2012. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2016

### **A.3. Sektorsteckbrief Haushalte**



# **Sektorsteckbrief**

## **Private Haushalte**

**Strategisches Leitprojekt**  
**Trends und Perspektiven der Energieforschung**

Teilprojekt:

Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende

(FKZ 03ET4036 X-Z)

**Autorinnen und Autoren:**

Britta Kleinertz, Jochen Conrad, Dr.-Ing. Christoph Pellingner, Simon Greif,

Dr.-Ing. Roger Corradini

FfE

Am Blütenanger 71, 81671 München

München, 26.04.2018

**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036 X-Z durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

**Kontakt:**

Britta Kleinertz

E-Mail: [bkleinertz@ffe.de](mailto:bkleinertz@ffe.de)

FfE

Am Blütenanger 71, 80995 München

**Gefördert durch:**

Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>II</b>
<b>1 Charakterisierung des Sektors .....</b>	<b>3</b>
1.1 Definition und Abgrenzung.....	3
1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung.....	3
1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen .....	6
<b>2 Herausforderungen für den Sektor .....</b>	<b>10</b>
2.1 Energie- und Klimaziele .....	10
2.2 Energie- und Emissionseinsparungen .....	10
<b>3 Forschungsbedarf – relevante Maßnahmen zur Zielerreichung im Sektor</b>	<b>17</b>
3.1 Energetische Sanierung der Gebäudehülle .....	17
3.2 Nachhaltiges Bauen in Planung und Umsetzung .....	19
3.3 IKT und Datenhandhabung .....	20
3.4 Nutzenergiebedarf reduzieren.....	21
3.5 Automatisierte effiziente Energieverteilung durch Smart Buildings/Smart Home	22
3.6 Effiziente Energieerzeugung .....	23
3.7 Direkteinsatz Erneuerbarer Energien.....	24
3.8 Charakterisierung der Verbraucher .....	25
3.9 Speicher in Wohngebäuden.....	26
3.10 Systemdienliche Lastflexibilisierung.....	27
<b>4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms .....</b>	<b>29</b>
4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen.....	29
4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs.....	30
<b>5 Fazit.....</b>	<b>33</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>35</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>36</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>37</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>46</b>

# 1 Charakterisierung des Sektors

Der Sektor Private Haushalte (pHH) ist neben Industrie, Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (GHD) und Verkehr einer der vier Energieanwendungssektoren. Im Folgenden wird der Sektor private Haushalte definiert (Kapitel 1.1), um darauf aufbauend seine Bedeutung sowie den Energieverbrauch und die resultierenden Emissionen zu analysieren (Kapitel 1.2). Abschließend werden aktuelle Entwicklungen, welche den Energieverbrauch des Sektors beeinflussen, dargestellt (Kapitel 1.3).

## 1.1 Definition und Abgrenzung

Gemäß [1] lautet die Definition für den Sektor private Haushalte folgendermaßen: „Als (Privat-)Haushalt zählt jede zusammenwohnende und eine wirtschaftliche Einheit bildende Personengemeinschaft (Mehrpersonenhaushalt) sowie Personen, die allein wohnen und wirtschaften (Einpersonenhaushalt, zum Beispiel auch Einzeluntermieter)“. Hiermit grenzt sich der Sektor pHH durch seine nicht-gewerbliche Nutzung von den Sektoren GHD und Industrie ab. Auf Grund der nicht-gewerblichen Nutzung werden Investitionsentscheidungen in privaten Haushalten nicht primär nach rein ökonomischen Kennwerten getroffen [2].

Der Sektor Verkehr, dessen Energieverbrauch ebenfalls zum Teil dem Sektor private Haushalte zugerechnet werden könnte, wird in einem gesonderten Steckbrief behandelt.

## 1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung

Der Sektor private Haushalte ist von besonderer gesellschaftlicher Bedeutung, da ihm jede Person im Privatleben zugehört. Im Jahr 2015 betrug der Endenergiebedarf der 40,8 Mio. Haushalte [3] insgesamt 665 TWh und damit 26 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfes [4].

Nach einer Erläuterung zu den betrachteten Energieanwendungsbereichen werden hier die direkten und indirekten Emissionen je Energieanwendung dargestellt.

### **Beschreibung der Energieanwendungsbereiche**

Eine Übersicht über die verschiedenen Energieanwendungsbereiche und beispielhafte Anwendungstechnologien stellt Tabelle 1 dar. Während die Abgrenzung einiger Bereiche naheliegt, ist eine Eingrenzung der Begriffe „sonstige Prozesswärme“ und „sonstige Prozesskälte“ sinnvoll. Sonstige Prozesswärme beinhaltet in privaten Haushalten Anwendungen, bei denen Wärme für einen anderen Zweck als das Bereitstellen von Raumwärme erzeugt wird. Analog dazu stellt sonstige Prozesskälte

jede Form von im Haushalt benötigter Kälte dar, die nicht für die Klimatisierung verwendet wird. Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) beinhaltet alle Technologien, in denen Informationen entweder digital umgesetzt, verarbeitet, gespeichert oder übertragen werden [5].

Tabelle 1: Beispiele für Energieanwendungsbereiche in privaten Haushalten

<b>Anwendungsbereich</b>	<b>Beispielhafte Anwendungstechnologie</b>
<b>Raumwärme</b>	Gaskessel
<b>Warmwasser</b>	Warmwasserboiler
<b>Sonst. Prozesswärme</b>	Wäschetrockner
<b>Klimakälte</b>	Klimagerät
<b>Sonst. Prozesskälte</b>	Kühl-/Gefriergerät
<b>Mechanische Energie</b>	Pumpen
<b>IKT</b>	TV/ PC-Bildschirm, WLAN-Router
<b>Beleuchtung</b>	Glühlampen, LED-Lampen

### **Direkte und indirekte Emissionen je Energieanwendungsbereich**

Je nach Auffassung des Sektorenbegriffes ist eine Unterscheidung der dem Sektor pHH zurechenbaren Emissionen möglich. Direkte Emissionen entstehen vor Ort durch Verbrennungsprozesse oder Leckagen beim Anwender. Indirekte Emissionen treten durch die Versorgung des Haushalts mit Strom und Fernwärme auf, sie sind somit Teil des Sektors Energiewirtschaft. Auch wenn die indirekten Emissionen der Haushalte in der Energiewirtschaft auftreten, sind sie verursacht durch den Energiebedarf der pHH. Da im Sektor pHH die Treibhausgas- (THG)-Emissionen zu fast 99 % durch CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht werden [6], wird im Folgenden ausschließlich auf die direkten und indirekten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen eingegangen.

In Abbildung 1 sind die im Sektor pHH relevanten Energieanwendungen und die hierfür verwendeten Energieträger mit den zugehörigen Emissionen für das Jahr 2015 dargestellt. Die gesamten Emissionen des Sektors betragen 187 Mio. t CO<sub>2</sub>. Der äußere Kreis (Anwendungsbilanz) verdeutlicht, dass 60 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Bereitstellung von Raumwärme verursacht werden. Der innere Kreis (Energieträgerbilanz) verdeutlicht, dass diese Raumwärme vor allem über die Energieträger Erdgas und Mineralöl bereitgestellt wird. Die zweithöchste Menge der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist mit 12 % der Warmwasserbereitstellung zuzurechnen, die

ebenfalls durch die Verwendung von Erdgas und Mineralöl sowie zu einem signifikanten Anteil durch Strom verursacht wird.

Die weiteren Anwendungen bedienen sich fast ausschließlich des Energieträgers Strom. Aufgrund des sich verändernden Strommixes hin zu erneuerbaren Energiequellen werden sich die spezifischen Emissionen der Strombereitstellung in Zukunft verringern. Dadurch wird sich die Emissions-Relevanz von Effizienzmaßnahmen für mit Strom versorgte Anwendungstechnologien reduzieren. Jedoch muss beachtet werden, dass für diesen Mehrbedarf an Strom zusätzliche gesicherte Leistung bereitgestellt werden muss.

Innerhalb des Sektors pHH verursacht der Energieträger Strom mit 65,4 Mio. t CO<sub>2</sub> ca. 35 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Strom wird in allen Anwendungsbereichen eingesetzt, während Fernwärme, fossile Gase, Kohle und Mineralöle lediglich in der Raumwärme und Warmwasserbereitung zum Einsatz kommen.

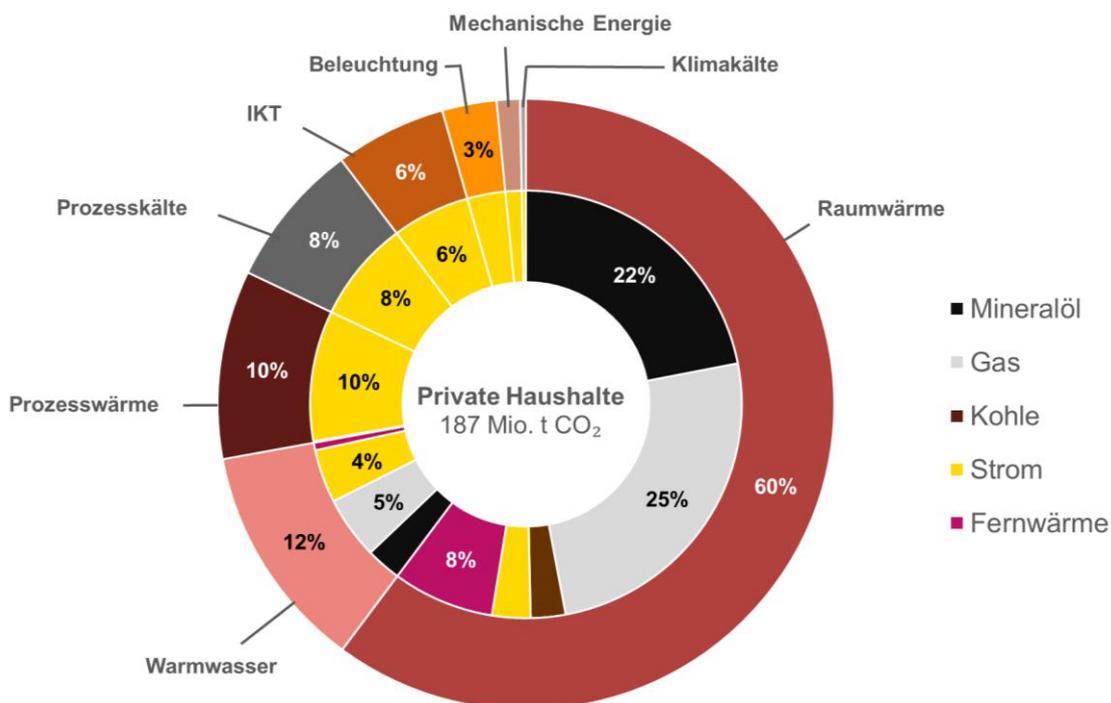


Abbildung 1: Direkte und indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträger und Anwendungsbereich des Sektors private Haushalte in Mio. t für das Jahr 2015 (Methodik aus [7] mit Daten aus [8], [9] und [4])

Bezogen auf die Gesamtemissionen in pHH liegt der Energieträger Gas mit 30 % an zweiter Stelle. Hierzu gehört in privaten Haushalten primär Erdgas und eine geringe Menge an Erdölgas. Der drittgrößte Verursacher von Emissionen sind Mineralöle mit einem Anteil von 25 %, bei diesen handelt es sich ausschließlich um leichtes Heizöl. Fernwärme hat einen Anteil von 8 % an den Emissionen für den Energieverbrauch von

Haushalten. Kohle findet in pHH wenig Anwendung und verursacht ca. 3 % der Emissionen.

Vergleicht man die Anteile der verschiedenen Energieträger an der Endenergiebereitstellung mit ihrem Anteil an den Emissionen (siehe Tabelle 2) zeigt sich, dass die Emissionsanteile von Kohle, Strom und Heizöl jeweils höher als deren Endenergieanteile liegen. Für den Energieträger Gas gilt anders herum, dass anteilig mehr Energie durch diesen bereit gestellt als emittiert wird.

Tabelle 2: Anteile der Energieträger am nicht über erneuerbare Energien im Haushalt abgedeckten Endenergiebedarf sowie deren Anteil an den Emissionen [4]

<b>Energieträger</b>	<b>Anteil an Endenergiebereitstellung</b>	<b>Anteil an Emissionen</b>
<b>Heizöl</b>	21 %	25 %
<b>Gas</b>	47 %	30 %
<b>Kohle</b>	2 %	3 %
<b>Strom</b>	22 %	35 %
<b>Fernwärme</b>	8 %	8 %

### 1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen

Technische Neuerungen haben zwar einen Einfluss auf die Entwicklungen in dem Sektor pHH, den sozioökonomischen Entwicklungen ist jedoch eine ebenfalls sehr hohe Relevanz einzuräumen [2]. Private Investitionsentscheidungen sind nicht ausschließlich von wirtschaftlichen Erwägungen geprägt. Wodurch einerseits Sanierungsmaßnahmen trotz finanzieller Vorteile nicht umgesetzt werden aber andererseits auch nichtwirtschaftliche Maßnahmen im Sinne eines grünen Gewissens durchgeführt werden. Durch kürzere Nutzungsdauern im Sektor GHD werden höhere Sanierungsquoten als im Sektor pHH erreicht [10].

Bei den technischen Trends wird zwischen folgenden Themengebieten differenziert:

- energetische Sanierung
- Wärmeerzeugung
- Quartierskonzepte
- Digitalisierung

Die sozioökonomischen Entwicklungen unterteilen sich in:

- Entwicklung der räumlichen Bedarfsstruktur des Energieverbrauches
- Einstellung der Privatpersonen zu ökologischen Fragestellungen
- rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen

Auf Grund der in Kapitel 1.2 ermittelten Relevanz des Wärmebedarfs wird hierauf verstärkt eingegangen.

### **Energetische Sanierung und Neubau von Gebäuden**

In den letzten Jahren haben sich die energetischen Mindestanforderungen an Neubauten sowie tiefgreifend zu sanierende Gebäude verschärft. Haupttreiber hierfür sind die Energieeinsparverordnung [11], welche den zulässigen Primärenergieverbrauch von Gebäuden festlegt, und das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz [12], welches den zu erfüllenden Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch festlegt.

Entgegen der von der deutschen Regierung angestrebten Sanierungsquote von 2 % pro Jahr [13], stagniert diese aktuell bei ca. 1 % [14]. Aufgrund der sinkenden Wärmeverluste durch die energetische Sanierung von Gebäuden und den Neubau von Niedrigenergiehäusern sinkt der durchschnittliche spezifische Energiebedarf für die Raumwärmebereitstellung. Allerdings liegt die Neubauquote aktuell unter 0,6 %, so dass der Neubau einen geringeren Anteil der Gebäude ausmacht [15]. Des Weiteren werden in den Wohnungen, speziell im Neubau, vermehrt Flächenheizungen, z. B. Fußbodenheizungen, verbaut, was zu einer Reduzierung der benötigten Vorlauftemperaturen führt [16]. Durch die Abnahme des Raumwärmebedarfs steigt perspektivisch die Relevanz des Endenergieverbrauches für die Bereitstellung von Warmwasser.

### **Wärmeerzeuger**

Durch die rechtlichen Anforderungen an die Wärmebereitstellung (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz) hat der Einsatz von Solarthermie, Holzheizungen und Wärmepumpen (in Neubauten vor allem Erdwärme und im Bestand im Rahmen einer Sanierung Luft-Wasser [17]) an Bedeutung gewonnen. Wärmepumpen und Solarthermieranlagen sind hierbei weiterhin mit einem Spitzenlastkessel, meist einem Gas-Brennwertkessel, versehen. Auf Grund der gesunkenen Preise für fossile Energieträger, speziell von Erdgas und Heizöl, haben sich die Ambitionen des Energieträger- bzw. Technologiewechsels in pHH zunehmend verringert [18].

Aus den Daten des Mikrozensus von 2014 lässt sich ableiten, dass in Neubauten das Warmwasser zu einem höheren Anteil aus zentralen anstelle von dezentralen Heizsystemen bereitgestellt wird [19].

### **Quartierskonzepte**

In der aktuellen Leitstudie der dena zur integrierten Energiewende wird Quartierskonzepten eine zentrale Rolle für die Effizienzsteigerung im Gebäudebereich zugeschrieben [14]. Die Bundesregierung unterstützt und fördert klimafreundliche Smart City oder Smart Community Konzepte, die vor dem Hintergrund einer

international zunehmenden Urbanisierung immer mehr an Relevanz gewinnen [20]. Hierzu werden aktuell verschiedene Konzepte umgesetzt, davon der Großteil als Forschungsprojekte zur integrierten Infrastrukturplanung (siehe [21], [22]).

### **Digitalisierung**

Durch den vermehrten Einsatz von IKT ermöglicht der Trend zur Digitalisierung eine zunehmende Vernetzung auch in pHH. Diese Vernetzung wird notwendig sein, um die erforderliche Flexibilität zur sicheren Versorgung mit fluktuierenden erneuerbaren Energieträgern bereitstellen zu können [20]. In aktuellen Forschungsprojekten werden Synergien mit anderen Sektoren, wie beispielsweise die intelligente Verbindung von Gebäudetechnik mit der Elektromobilität untersucht (z. B. [22]). Diese weitreichende Nutzung von digitaler Messtechnik und intelligenten Steuergeräten ist bisher noch nicht im Massenmarkt angekommen.

### **Entwicklung räumlicher Bedarfsstruktur**

Für pHH sind der demografische Wandel, die Urbanisierung und die zunehmende Anzahl an Einpersonenhaushalten von grundlegender Bedeutung. Insgesamt werden bis zum Jahr 2030 mehr Menschen in dicht besiedelten Gebieten sowie nachverdichteten städtischen Strukturen wohnen [23]. Dieser hohe Bedarf an Wohnraum in Städten hat zur Folge, dass Wohnungsmieten in Großstädten die Kaufkraft von Geringverdienern zunehmend übersteigen. [24], [25]

### **Einstellung der Privatpersonen zur Energiewende**

Vielfältige sich widersprechende öffentlichkeitswirksame Publikationen zu den Effekten einer Gebäudesanierung haben zu einer Verunsicherung der Privatpersonen über Effizienz, Sicherheit und ggf. negative Rückwirkungen der Dämmung auf Wohngebäude geführt ([26] und [27] zu [28]). Sanierungsmaßnahmen in Großstädten sind zum Teil in Gentrifizierungsmaßnahmen eingebettet, wodurch die Akzeptanz von Sanierungsmaßnahmen reduziert wird [29].

### **Rechtliche und regulatorische Eingriffe**

Zur Steigerung der Energieeffizienz wurden in den letzten 20 Jahren sowohl die Effizienzanforderungen an Gebäude als auch an Geräte kontinuierlich verschärft [30]. Zudem erfassen die Anforderungen der Energieeffizienz-Richtlinien für Strom verbrauchende Geräte immer mehr Geräte. Des Weiteren steigt die Anzahl an Programmen zur Förderung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien im Wärmemarkt in den letzten Jahren (z. B. CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm, Marktanzreizprogramm).

Während die Einspeisevergütung aktuell sinkt, steigt der Haushaltsstrompreis. Daher wird die Eigenstromnutzung es für pHH attraktiver. Ab einer installierten Leistung von 10 kW reduziert sich dieser Anreiz um die zu zahlende EEG-Umlage [31]. Durch die Förderung des Mieterstrommodells wird es auch für Mieter attraktiv, sich an der Energiewende zu beteiligen [31].

## 2 Herausforderungen für den Sektor

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die Energie- und Klimaziele der Bundesregierung dargestellt (Kapitel 2.1). Danach werden verschiedene Szenarien zur Erreichung der angestrebten Energie- und Emissionseinsparungen miteinander verglichen und die jeweils hinterlegten Annahmen diskutiert (Kapitel 2.2).

### 2.1 Energie- und Klimaziele

Das Energiekonzept der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 verlangt eine Nutzung des hohen Energieeinsparpotenzials durch energetische Gebäudesanierung. Der Primärenergiebedarf der Gebäude soll, verglichen mit 2008, bis zum Jahr 2020 um 20 % und bis 2050 um 80 % sinken. [32]

Der fünfte Monitoring-Bericht fordert anstelle einer 1,7 %-igen jährlichen Verminderung des Wärmebedarfs bei Gebäuden eine Reduktion von 2,1 % pro Jahr für die Jahre 2015 bis 2020. Der Anteil erneuerbarer Energien am Wärme- und Kälteverbrauch soll bis 2020 bei 14 % liegen. [33]

Im Klimaschutzplan 2050 (KSP) des Bundesumweltministeriums wird als politische Zielvorgabe die Senkung der CO<sub>2</sub>-Äq.-Emissionen in Gebäuden um 67 % bis 2030 gegenüber 1990 genannt. [20]

Bis 2050 fordern alle drei Zielsetzungen wörtlich einen „nahezu klimaneutralen Gebäudebestand“.

### 2.2 Energie- und Emissionseinsparungen

In diesem Kapitel werden zunächst die analysierten Szenarien diskutiert und darauf aufbauend die resultierenden Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen. Im letzten Schritt werden in den Szenarien hinterlegte Restriktionen zur Entwicklung des Wärmebedarfs dargestellt.

#### Auswahl relevanter Szenarien

Sowohl in den Szenarien, die sich aus der Fortschreibung aktueller Entwicklungen ergeben (Trendszenarien), als auch in jenen, die aktuelle EU-Ziele bezüglich erneuerbarer Energien, THG-Emissionen und Energieeffizienz erreichen, (Referenzszenario, [34]) wird das deutsche CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel nicht erreicht [35]. Daher werden im Folgenden nur solche Szenarien betrachtet, die das Reduktionsziel erreichen (Zielszenarien). Als Grundlage dienen die Metastudien „Sektorale Emissionspfade in Deutschland 2050“ [10] und „Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050“ [35].

Die Rahmenbedingungen für die verschiedenen betrachteten Szenarien sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Untersuchte Energieszenarien mit Zielen und Abkürzungen [35]

Referenzszenarien	THG-Minderungsziel in 2050	Abkürzung
Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Referenzszenario, Trendszenario [36]	-	ERP-Ref
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Aktuelle Maßnahmen Szenario [37]	-	KSZ-AMS
<b>Zielszenarien</b>		
Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Zielszenario [36]	80% (1)	ERP-Ziel
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 80 [37]	80%	KSZ-KS80
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 95 [37]	95%	KSZ-KS95
Klimaschutzszenarien 1. Runde, Klimaschutzszenario 90 [38]	90%	KSZ-KS90
Leitstudie 2011, Szenario A [32]	80%	LS 2011-A
Leitstudie 2011, Szenario THG95 [32]	95% (2)	LS 2011-THG95
Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 [39]	95%	THGND

(1) nur energiebedingte Emissionen

(2) Ziel wird erst 2060 erreicht

## Endenergie bzw. Primärenergie

Abbildung 2 stellt den einzusparenden Endenergiebedarf je Sektor abhängig vom betrachteten Szenario dar. In allen Szenarien wird mit einem hohen Energieeinsparpotenzial im Sektor pHH gerechnet. Die beiden Referenzszenarien gehen von einem Rückgang des Endenergiebedarfs in privaten Haushalten von 45 % bzw. 40 % aus. Für die Erreichung des 80 %-Ziels werden in allen Szenarien Einsparungen des Endenergiebedarfs um 50 % als notwendig angesehen.

Betrachtet man die angestrebten Einsparungen zur Erreichung des 95 % Ziels, unterscheiden sich die erwarteten Endenergieeinsparungen in privaten Haushalten sehr stark zwischen den Szenarien. Während in *LS 2001-THG95* davon ausgegangen wird, dass 52 % der Endenergie eingespart werden muss, sind dies in *KSZ-K95* hingegen 58 % und in *THGND* sogar 80 %.

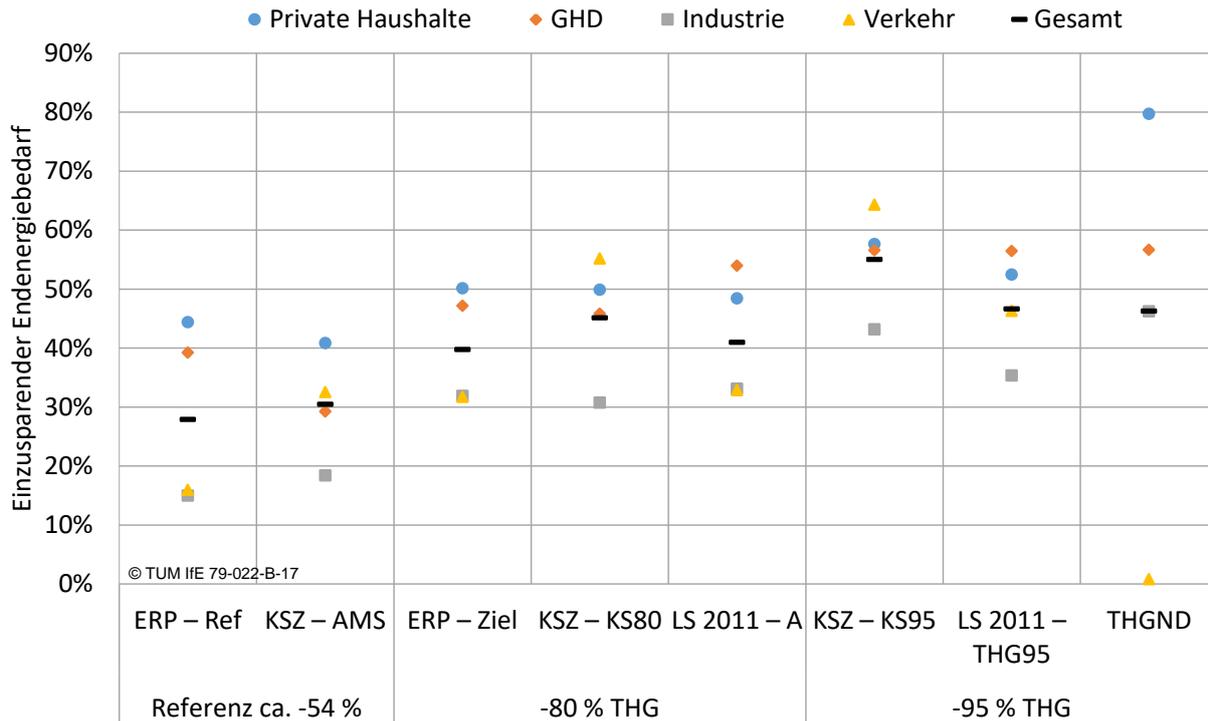


Abbildung 2: Darstellung des einzusparenden Endenergiebedarfes in den verschiedenen Sektoren nach [35]<sup>1</sup>

In allen Zielszenarien nimmt der Endenergieverbrauch von Wohngebäuden von 550 bis 750 TWh/a in 2010 auf unter 400 TWh/a ab. Die Entwicklung des Einsatzes fossiler Primärenergie sinkt, abhängig vom betrachteten Szenario, von 600 bis 800 TWh/a auf unter 200 TWh/a und damit sehr viel stärker als die Endenergiebereitstellung. [10].

Beispielhaft wird für die Reduktion der THG-Emissionen um 80 % im *KSZ KS80*-Szenario von einer sukzessiven Erhöhung der Sanierungsrate von 1,2 % pro Jahr in 2020 auf 3 % pro Jahr in 2050 ausgegangen. Durch einen erhöhten Einsatz von Wärmepumpen steigt der Strombedarf bei pHH, während der Anteil fossiler Energieträger abnimmt. Die Ausstattungsraten der pHH mit elektrischen Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Klimageräten sowie deren Effizienz basieren auf der historischen Entwicklung.

Im verschärften Szenario *KSZ KS95* wird zur Reduktion der THG-Emissionen um 95 % eine sukzessive Erhöhung der Sanierungsrate von 1,2 % pro Jahr in 2020 auf fast 4 % pro Jahr in 2050 angesetzt. Zudem wird von einem Bewusstseinswandel der Bewohner zu einer elektronischen Ausstattung mit niedrigerem Energieverbrauch ausgegangen. Der spezifische Stromverbrauch der einzelnen Gerätekategorien, der Beleuchtung und Klimageräte wird durch die Einführung neuer Effizienzklassen und das Ersetzen von alten Geräten verringert. Nutzungszeiten reduzieren sich in dem

<sup>1</sup> Der Endenergieverbrauch im Verkehr bleibt in „THGND“ aufgrund der Mitbilanzierung des internationalen Flug- und Seeverkehrs nahezu gleich.

Szenario vor allem bei IKT-Komponenten. Hier wird teilweise durch eine Überkompensation der Effizienzgewinne durch intensivere Nutzung von höherem Stromverbrauch als aktuell ausgegangen (Rebound Effekt). Effizienzsteigerungen bei Beleuchtungsanwendungen sind vor allem durch den forcierten Einsatz von LED-Lampen zu erwarten.

Bei aktuellen Maßnahmen im Szenario *KSZ AMS* wird ebenfalls eine Steigerung der Sanierungsrate von 0,8 % pro Jahr in 2020 auf 2 % pro Jahr in 2050 erwartet. In dem Szenario kommt es zu der Benutzung der weniger effizienten Leuchtstofftechnologie.

In allen Szenarien werden lange Reinvestitionszyklen der Sanierung, der einzelnen Heiztechnologien und der elektrischen Endgeräte angesetzt. Daher erfolgt der Austausch der Technologien nur einmal innerhalb der betrachteten Dauer. [10]

### **THG-Emissionen**

Abbildung 2 zeigt die prozentuale Reduktion der THG-Emissionen nach Umsetzung verschiedener THG-Verminderungsmaßnahmen in den Sektoren zur Erreichung des jeweiligen THG-Minderungsziels. Dabei zeigt sich, dass sich die erwarteten Emissionseinsparungen in den Sektoren im Szenario *ERP-Ziel* (Szenario zur Reduktion der THG-Emissionen um 80 %) stark unterscheiden. Die Einsparungen in den Sektoren Haushalte und GHD liegen hier bereits bei 90 %, während im Industriesektor nur eine Einsparung von 64 % angenommen wird. Erst bei hohen THG-Reduktionsanforderungen von 95 % gleichen sich die erwarteten Einsparungen der THG-Emissionen über alle Sektoren an. Da speziell im Bereich Landwirtschaft durch nicht-energetische Emissionen die THG-Emissionen nicht komplett reduzierbar sind, sind in allen betrachteten Sektoren Einsparungen von nahezu 100 % notwendig.

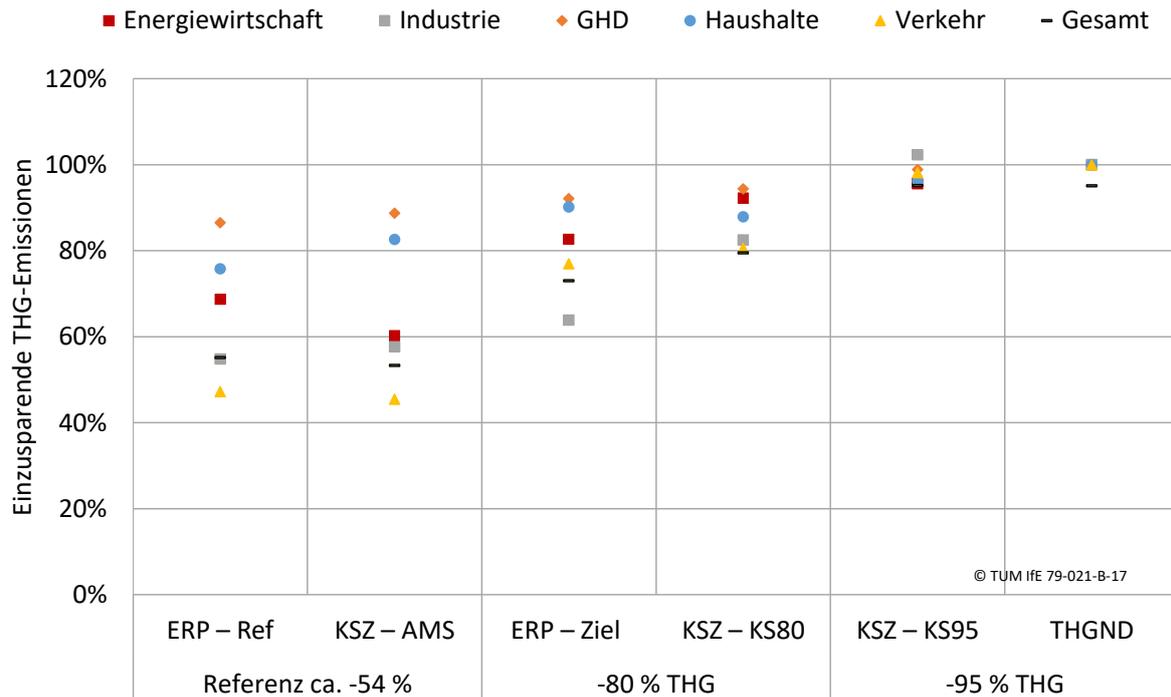


Abbildung 2: Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2050 nach [35]<sup>2</sup>

In Abbildung 3 sind die Reduktionen der THG-Emissionen aller Sektoren in den verschiedenen Referenz- und Zielszenarien über die Zeit miteinander verglichen. Das Trendszenario (*KSZ AMS*) zeigt mit 54 % und das Referenzszenario (*ERP-Ref*) mit 56 % eine deutliche Unterschreitung des politischen Zieles einer Einsparung der THG-Emissionen um 80 %. Es werden lineare bzw. annähernd lineare Entwicklungen angenommen. THG-Emissionen werden zunächst dort eingespart, wo die Grenzkosten dafür am geringsten sind. Somit fallen für später durchgeführte Einsparungen höhere Grenzkosten an. Da die Menge der einzusparenden Emissionen fast gleich bleibt, steigen dann die spezifischen Gesamtkosten zur Reduzierung der THG-Emissionen über die Jahre. Damit wird der Kostenaufwand zur Reduzierung von THG-Emissionen unverhältnismäßig stark in die Zukunft verlagert. Dies wird durch vorher ggf. stattfindende Fehlinvestitionen verbunden mit sogenannten Lock-in-Effekten weiter verstärkt. [10]

<sup>2</sup> Im „KSZ-KS95“-Szenario können für den Sektor Industrie über 100% THG-Emissionen eingespart werden, da das in Biogasanlagen entstehende und üblicherweise als neutral bilanzierte CO<sub>2</sub> durch Abscheidung und Speicherung (CCS) nicht in Atmosphäre emittiert wird.

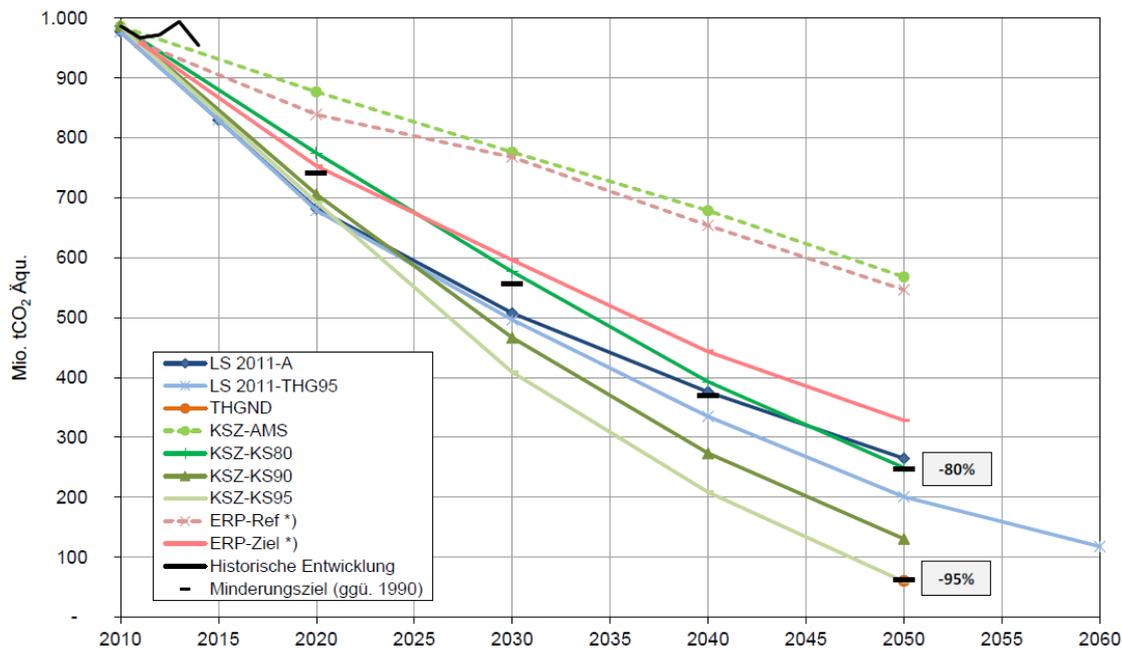


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der gesamten THG-Emissionen abhängig vom Szenario [35]

### Annahmen und Restriktionen

In allen Szenarien werden die CO<sub>2</sub>-Einsparungen in pHH aus einer Kombination von Effizienzsteigerungen und der Substitution fossiler Energieträger durch emissionsarme bzw. emissionsfreie Energieträger erreicht.

Die Gegenüberstellung der Szenarien im Hinblick auf das Verhältnis von Energieeinsparung durch Energieeffizienz und dem Anteil der Erneuerbaren Energien im Energiemix, erlaubt eine Einordnung der Szenarien in robuste und unrealistische Szenarien. Dies ist visuell in Abbildung 4 beschrieben. Auf der X-Achse ist hierbei die Reduktion des Endenergiebedarfes bezogen auf den Bedarf im Jahr 2008 dargestellt. Der grau dargestellte Bereich visualisiert einen Sockel, der durch Sanierungsmaßnahmen nicht mehr erreicht werden kann. Das liegt zum Beispiel an der verbleibenden Restdurchlässigkeit von Dämmmaterialien, dem Denkmalschutz oder zu niedrigen Deckenhöhen [40]. Diese Grenze kann potenziell unter Anwendung innovativer Technologien weiter nach rechts verschoben werden. Auf der Y-Achse ist der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Endenergiebereitstellung aufgetragen.

Generell gilt, je geringer ein Szenario die Endenergieeinsparung annimmt, desto höher muss der Anteil Erneuerbarer Energien an der Endenergiebereitstellung sein, um die Emissionsziele zu erfüllen. Diese Rahmenbedingung ist durch die blauen Linien in die Abbildung eingebunden, welche jeweils die untere Grenze des Zielkorridors der THG-Emissionen markieren (durchgezogen: 80 % THG-Reduktion, gestrichelt: 95 % THG-Reduktion). Die grüne Linie illustriert die Potenzial-Obergrenze für die

Wärmeversorgung aus erneuerbaren Quellen. Hierbei gilt die Grafik für den gesamten Gebäudebestand, also die Summe aus Wohn- und Nichtwohngebäuden.

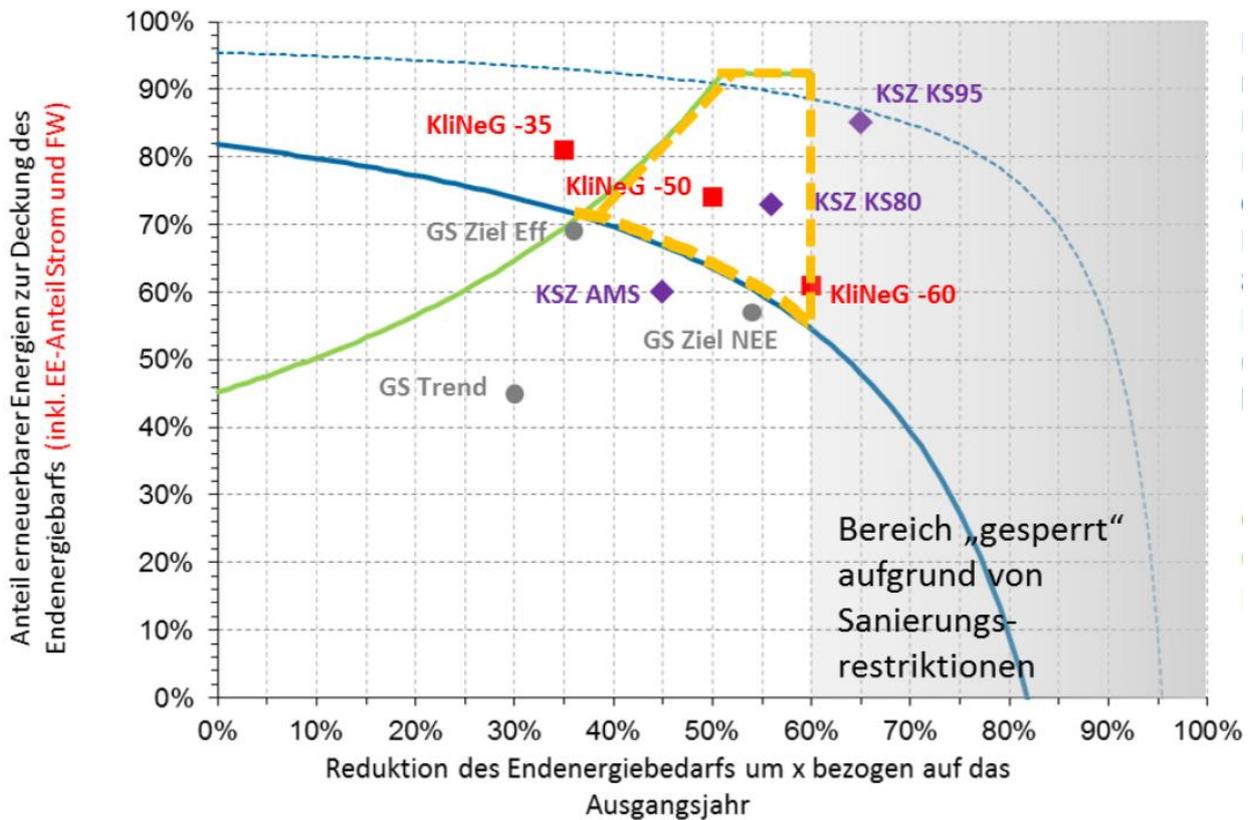


Abbildung 4: Zielkurve des Anteils erneuerbarer Energien an der Endenergiebereitstellung in Abhängigkeit von der Endenergiereduktion [10]

Über die Kombinationsmöglichkeiten aus Reduktion des Endenergiebedarfs und notwendigem und verfügbarem Anteil erneuerbarer Energien zur Deckung des Endenergiebedarfs ergibt sich ein Ziel-Polygon. Dies ist in Abbildung 4 für ein angesetztes THG-Minderungsziel von 80 % in Gelb dargestellt.

Bei Wohngebäuden wird in *KSZ-K95* bis 2050 von einer maximalen Reduktion des Endenergieverbrauchs von 65 % ausgegangen. Zur Erreichung dieser Entwicklung müssten also die oben genannten Restriktionen hinsichtlich der Sanierungsgrenze aufgelöst werden.

### **3 Forschungsbedarf – relevante Maßnahmen zur Zielerreichung im Sektor**

Die Prioritätenreihenfolge zur Erreichung der THG-Ziele und der daraus abgeleiteten notwendigen Maßnahmen ordnet sich wie folgt:

1. Energiebedarf reduzieren
  - energieeffiziente Gebäudehülle
  - nachhaltiges Bauen in Planung und Umsetzung
  - Nutzenergiebedarf reduzieren
  - Verbrauchsmessung sowie -visualisierung und IKT
  - automatisierte effiziente Energieverteilung durch Smart Buildings/Smart Home
2. Energiebedarf effizient und möglichst direkt über Erneuerbare Energie decken
  - effiziente Energieerzeugung
  - Direkteinsatz Erneuerbarer Energien
3. Energiebedarf systemdienlich einsetzen
  - Charakterisierung der Verbraucher
  - Speicher in Wohngebäuden
  - systemdienliche Lastflexibilisierung

Alle Ebenen beziehen sich sowohl auf den Wärme- als auch Kälte- und Strombedarf.

Generell weisen technische Komponenten im Sektor pHH Lebensdauern von mehr als 20 Jahren auf. Dies beinhaltet Energie- und Klimatechnik genauso wie elektrische Großgeräte (weiße Ware). Daher ist es notwendig, den wesentlichen regulatorischen Rahmen zu Energieeffizienz und erlaubter Gebäudetechnik bis 2030 in die Wege geleitet zu haben. Nur so unterliegt bis 2050 annähernd der gesamte Gebäudebestand der Umsetzung effizienzsteigernder Maßnahmen. Dementsprechend fungiert das Jahr 2030 als Meilenstein für Maßnahmen im pHH-Sektor.

#### **3.1 Energetische Sanierung der Gebäudehülle**

Der Sanierung der Bestandsgebäude kommt zur Reduzierung des Energieverbrauches eine bedeutende Rolle zu [14]. Insgesamt sind 72 % der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in pHH auf die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser zurückzuführen. Hier besteht also der größte Hebel zur Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Renovierungszyklen im Bereich der Wärmeversorgung sind in privaten Haushalten länger als in Nichtwohngebäuden [41]. Dies führt dazu, dass effizientere Technologien (z. B. Dämmung, Wärmeerzeuger) sehr langsamen Einzug

finden und vorzeitig Maßnahmen ergriffen werden müssen, um den Energiebedarf zu senken [42]. Das Potenzial der Effizienzsteigerung in Gebäuden ist, wie in Kapitel 2.2 dargelegt durch Sanierungsrestriktionen im Bestand eingeschränkt.

Tabelle 4: Forschungsbedarf zu „Energetische Sanierung der Gebäudehülle“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Erstellung von Leitlinien zur Abwägung zwischen Sanierung von Bestandsgebäuden und Abriss mit anschließendem Neubau (abgeleitet aus Erläuterungen zu Sanierungsrestriktionen in Kapitel 2.2, auch [43], [44]).		X	X		
Entwicklung von schlanken Hochleistungsdämmstoffen im Hinblick auf Kosten, Nachhaltigkeit (niedriger Energieaufwand, Langzeitstudien) und Ökologie (mineralische, pflanzliche Stoffe) für die Sanierung von Bestandsgebäuden. Der Fokus liegt auch auf der Multifunktionalität (wärmedämmend und wärmespeichernd) dieser Dämmstoffe. [45], [46]		X			
Bezifferung der Effizienzpotenziale von Einzelmaßnahmen in Abhängigkeit der Gebäudedimensionen (Dämmung von Wand/ Dach, etc.) sowie kombinierter Maßnahmen. Hieraus Ableitung ganzheitlicher Sanierungsfahrpläne. [45]		X			
Entwicklung von Anreizen für tiefgreifende Sanierung wie verbesserte Abschreibungsmöglichkeiten, veränderte Umlagen auf fossile Brennstoffe, neue Finanzierungs- bzw. Geschäftsmodelle für Sanierungsmaßnahmen (z. B. Green Bonds, KfW-Förderung) [14].			X	X	
Benennung zeitlich gestaffelter Lock-In-Effekte der Sanierung in der Übergangsphase zum effizienten Gebäudebestand unter Anbetracht von Reinvestitionszyklen (abgeleitet aus geringer Sanierungsrate, Restriktionen der Sanierung durch Reinvestitionszyklen und zu erreichendem Effizienzziel, auch [20]).			X		
Ausgestaltung einer Effizienzregulatorik für Bestandsgebäude (ähnlich EnEV) und Ermittlung von Akzeptanzmaßnahmen zum Abbau von Hemmnissen bezüglich der Sanierung [14].				X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.2 Nachhaltiges Bauen in Planung und Umsetzung

Aktuell besteht ein hoher Bedarf an Sanierungsmaßnahmen, der Schaffung neuen Wohnraumes in Städten sowie die Notwendigkeit alte, nicht sanierfähige Gebäude durch Neubauten zu ersetzen. In allen Fällen ist eine ganzheitliche Planung der konstruktiven Eingriffe genauso essenziell wie deren Umsetzungsqualität. Da ein hoher Zementbedarf zu hohen Emissionen führt, muss der hohe Bedarf an Baustoffen auch aus anderen Quellen gedeckt werden. Bisher ist die Baubranche jedoch durch Ineffizienzen geprägt, welche unter anderem durch die vorhandenen sozialen Strukturen in der Baubranche sowie der Vielzahl verschiedener Fachleute zu begründen sind [47].

Speziell bei der Nachverdichtung in Städten ist hierbei dem potenziell entstehenden Stadtklima bei der Planung Rechnung zu tragen [48].

Tabelle 5: Forschungsbedarf zu „Nachhaltiges Bauen in Planung und Umsetzung“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Weiterentwicklung der Baumaterialien zur Erreichung einer verbesserten Ökobilanz durch Verwendung innovativer Materialien, verstärktes Recycling, Verminderung der Verwendung umweltgefährdender Rohstoffe und brennbarer Materialien sowie Reduktion des Bedarfs an Material [46].	X	X	X		
Nutzen von intelligenten Planungsmodellen wie Building Information Modelling zur optimalen Auslegung von Neubauten (Gebäudehülle und -technik) und Ermittlung des notwendigen Rahmens zur weitreichenden Anwendung der Modelle [47], [49].		X			
Bewertung des energetischen, wirtschaftlichen und sozialen Nutzens von Quartierskonzepten sowie notwendige Rahmenbedingungen für die Umsetzung (abgeleitet aus [20]).	X	X	X	X	
Festlegung von baufreien Zonen zur Verhinderung von Stadtklima (Temperatur Hotspots und Schadstoffakkumulation auf Grund fehlender Lüftung) sowie Ermittlung notwendiger Anpassungsmaßnahmen [50].					X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte

**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.3 IKT und Datenhandhabung

Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) kann genutzt werden, um Energieverbrauchern ihren Verbrauch über Auswertung und Visualisierung verständlich zu machen. Hierdurch können Potenziale für Energie- und Kosteneinsparungen gehoben werden [51]. Der zukünftig vermehrte Einsatz von IKT sollte aber nicht zu einem stark ansteigenden Stromverbrauch führen und somit potenzielle Effizienzsteigerungen kompensieren. Des Weiteren gilt IKT als essenzieller Faktor, um Flexibilität auf der Verbraucherseite zu erschließen [52]. Daher fordern Energieversorger Zugriff auf netzdienliche und netzkritische Daten. Sie erwarten, dass die gesetzlichen Regelungen zum Datenschutz nicht zu restriktiv umgesetzt werden, damit technologische Innovationen nicht verhindert werden [52]. Verbraucherschützer fordern hingegen möglichst restriktiven Zugang zu den Daten.

Tabelle 6: Forschungsbedarf zu „IKT und Datenhandhabung“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Untersuchung von Möglichkeiten zur ressourcenschonenden, umweltfreundlichen und nachhaltigen Produktion von IKT-Hardware und deren Komponenten [53].	X	X			
Entwicklung Smart-Home-fähiger Technologien, Geräte und Komponenten sowie standardisierter hydraulischer, mechanischer sowie elektrischer Kommunikationsschnittstellen [54], [46].		X			
Steigerung der Sicherheit vor Eingriffen eventuell durch parallele Kommunikationsnetzwerke sowie Definition von Sicherheitsstandards für Systeme und Datenschutz [52]		X			X
Definitionen, welchem Akteur welche Daten zur Verfügung gestellt werden - Abwägung von Nutzung der Daten zur Systemoptimierung und Datenschutz [52], [55].				X	
Steigerung der Effizienz von elektrischen Geräten, Entwicklung energieeffizienterer Netzwerkstandards und Aufklärung bezüglich sinnvollem Einsatz für Geräte im Dauerbetrieb wie Router [46], [53]				X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.4 Nutzenergiebedarf reduzieren

Verschiedene Studien haben bereits beispielhaft gezeigt, dass eine weitreichende Reduzierung des Nutzenergiebedarfes für Strom, Raumwärme und Warmwasser möglich ist [56], [57], [51]. Die verschiedenen Möglichkeiten der Verbrauchsreduktion sind gegeneinander zu stellen und den verschiedenen Verbrauchertypen zuzuordnen.

Tabelle 7: Forschungsbedarf zu „Nutzenergiebedarf reduzieren“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Ermittlung deutschlandweit erreichbarer Energieeinsparpotenziale in den Bereichen Raumwärme, Warmwasser und Strom durch reine Verhaltensanpassung oder Umsetzung geringinvestiver Maßnahmen (z. B. Durchflussbegrenzer in Spülbecken, Spararmaturen in [56], Dusche in [58]).	X			X	
Bestimmung des Potenzials der Verbrauchsreduktion durch optimiertes Monitoring und Visualisierung des Energieverbrauchs sowie Möglichkeiten zur Verbreitung verschiedener Konzepte [57].		X		X	
Maßnahmen zur Reduzierung des Rebound-Effektes und Strategien zur breiten Umsetzung dieser Maßnahmen [59].  (Wird durch die Implementierung von Energieeffizienzmaßnahmen eine vermehrte Nachfrage bzw. Nutzung bewirkt und dadurch das eigentliche Einsparpotenzial nicht ausgeschöpft, redet man vom Rebound-Effekt.)				X	
Vergleich der Effizienz Betrachtung von Energieverbrauchs-komponenten über die gesamte Lebensdauer und nur im Betrieb. Hieraus ggf. Ableitung der Anpassung der Berechnung von Ökodesign-Grenzwerten und Effizienzlabels sowie dynamischer Effizienzgrenzwerte für Geräte in Anbetracht von Reinvestitionszyklen [35].			X	X	
Entwicklung regulatorischer Ansätze zur Senkung des Nutzenergiebedarfs, z. B. einer progressiven Steigerung der Steuern auf bereitgestellte Endenergie mit steigendem Energieverbrauch [60], [61].			X		

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.5 Automatisierte effiziente Energieverteilung durch Smart Buildings/Smart Home

Neben der Reduzierung des Energieverbrauches auf der Anwenderseite (Kapitel 3.4) stellt die Reduzierung von Verteilverlusten einen Hebel zur Energiebedarfsreduktion dar. Verluste treten in der Energieverteilung speziell in der Warmwasser- und Raumwärmeverteilung sowie aufgrund inadäquate Regelung der Wärmeerzeuger auf [62, 63]. Bei der Warmwasserbereitstellung liegen die Verluste häufig höher als der Bedarf.

Unter Einsatz einer intelligenten Gebäudeautomation kann anhand von Messungen eine adäquate Steuerung der Energieerzeuger, -speicher und der Energieverteilung erreicht und somit Verluste der Energiebereitstellung vermindert werden [46].

Tabelle 8: Forschungsbedarf zu „Automatisierte effiziente Energieverteilung durch Smart Buildings/Smart Home“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Bestimmung des notwendigen Ausmaßes an verwendeten Messgeräten und Kommunikationseinheiten zur effizienten Ermittlung relevanter Energieströme in pHH [46].	X	X		X	
Praktisch erreichbare Potenziale zur Energie- und Kosteneinsparung durch Umsetzung gering-investiver Maßnahmen der Betriebsoptimierung und des intelligenten Gebäudemanagements (abgeleitet aus [62], [56], [64]).		X	X		
Entwicklung von Energiemanagementsystemen für optimierte Steuer- und Regelungskonzepte (Sektorkopplung Strom, Wärme/Kälte, Mobilität) im Gebäudesystem für Maximierung solarer Deckungsanteile und Smart Grid Fähigkeit [54], [46].					
Potenzialabschätzung des Einsatzes von Lernverhalten im Energiemanagementsystem (z. B. Intelligente Zirkulationspumpe/Wohnraumtemperierung) [46].	X	X			X
Akzeptanz des intelligenten Gebäudemanagements und Möglichkeiten der Bewusstseins-schaffung in der breiten Bevölkerung für dessen Potenziale [46].				X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.6 Effiziente Energieerzeugung

Ebenso wie die Verteilung der Energie im Gebäude, sollte die Erzeugung des Stromes und der Wärme mit möglichst geringen Verlusten verbunden sein. Hinzu kommt, dass speziell eine Versorgung ausschließlich mit Wärmepumpen in ganz Deutschland auf Grund hoher Gleichzeitigkeit des Wärmebedarfs zu einer hohen Netzbelastung führen kann. Daher ist hier eine gesamtsystemische Betrachtung für die Wahl der effizientesten Technologien zur Strom- und Wärmebereitstellung in Haushalten erforderlich.

Um den Einsatz effizienter Technologien zu forcieren, ist die Einbindung des Handwerks ein essenzieller Faktor, da dieses die benötigte Nähe zum Kunden hat. Hierbei ist vor allem wichtig, dass die Handwerker den Technologien vertrauen und diese ohne Komplikationen einbauen können. [65], [66]

Tabelle 9: Forschungsbedarf zu „Effiziente Energiebereitstellung“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Grenzen von Energieversorgungstechnologien aufzeigen sowie Rückwirkungen auf das gesamte Energieversorgungssystem durch Umstellung der Energieversorgungstechnologien z. B. durch Negativeffekt durch Gleichzeitigkeit von Wärmepumpen [67]. Daraus Ableitung notwendiger Menge nicht-strombasierter Wärme- und Kälteversorgung sowie Nutzen von Hybrid-Lösungen [14].		X	X		X
Vergleich der Gesamteffizienz von Einzelversorgung verglichen mit zentralen Konzepten für Raumwärme, Warmwasser und Strom bezogen auf Verteil-, Umwandlungs- und Hilfsenergieverluste sowie Ableitung von Handlungsempfehlungen [68]	X	X			X
Erstellung zielführender Schulungskonzepte für Handwerksbetriebe zur optimalen Einstellung von Versorgungssystemen [65], [66].				X	
Erweiterung des Wärme- und Effizienz-Contractings und Stärkung des rechtlichen Rahmens, um kurzfristige und hohe finanzielle Belastung der Gebäudebesitzer zu reduzieren [69].			X	X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.7 Direkteinsatz Erneuerbarer Energien

Parallel zur deutlichen Erhöhung der Energieeffizienz ist zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen eine deutliche Reduzierung der Verbrennung fossiler Energieträger zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser notwendig. Dies soll sowohl durch den Einsatz Erneuerbarer Energien in den Haushalten bzw. in Wärmenetzen als auch durch die Nutzung hocheffizienter Wärmepumpen erreicht werden. [68]

Tabelle 10: Forschungsbedarf zu „Direkteinsatz Erneuerbarer Energien“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Möglicher Nutzen eines zeitlich differenzierten Leistungspreises für Wärme- und Strombezug statt Arbeitspreis zur gerechteren Verteilung der Netzkosten. (abgeleitet aus folgendem Umstand: Auch bei bilanzieller Vollversorgung mit erneuerbaren Energien ist der volle Netzanschluss auf Grund von Strombezug und –rückspeisung notwendig. In dem Falle sind jedoch keine Netzentgelte, welche über die netto bezogene Energiemenge abgerechnet werden, fällig.)			X	X	
Entwicklung von Marktbedingungen, die eine direkte Anwendung von Erneuerbaren Energien und Wärmepumpen verglichen mit fossilen Energieträgern wirtschaftlicher machen (z. B. Erneuerbaren-Umlage auf alle Energieträger) [70].			X	X	
Bestimmung des für die Niedertemperatur-Wärmebereitstellung verfügbaren Biomassepotenzials unter Anbetracht des sektorenübergreifenden Bedarfs an Biomasse zur energetischen und stofflichen Nutzung. Darauf aufbauend Ableitung eines Nutzungs-Transformationspfades (abgeleitet aus der Diskrepanz in aktuellen Studien zum verfügbaren Biomassepotenzial für die energetische Nutzung [71], [72] sowie Diskrepanz des angesetzten Potenzials in den Zielszenarien aus [36], [38], [73]).					X
Neubewertung der Methodik zur Bestimmung des Primärenergiefaktors. Unterscheidung zwischen Primärenergiefaktoren verschiedener Biomassetypen und bessere Einordnung der Primärenergiefaktoren der Energiequellen zueinander [74].				X	

Notwendig vorzuhaltende Technik für „Dunkelflaute“ in Haushalten, Abwägung zwischen zentralen Kraftwerken und dezentralen Einheiten (Speicher, kleine KWK-Anlagen mit Kraftstofftank bzw. Gasnetzanschluss) [68].		X			X
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	---	--	--	---

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.8 Charakterisierung der Verbraucher

Für die Energieforschung, speziell für die Untersuchung der Potenziale für Lastflexibilisierung und somit Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien, ist eine Kenntnis über die Charakteristika der Verbrauchsgeräte und der Bedarfslastgänge essenziell. Viele dieser Daten sind jedoch nicht zugänglich, so dass in Modellierungen weitreichende Annahmen getroffen werden müssen. Da die Qualität und Aussagekraft von Modellierungsergebnissen mit der Qualität der Eingangsdaten korreliert, sind Verfügbarkeit und Praxisnähe dieser Eingangsdaten zu verbessern.

Auch wird von Versorgern angeregt, Kunden, welche aktuell noch über Standardlastprofile abgerechnet werden, durch Einsatz der gemessenen Lastgänge in Zukunft nach ihrem Verbrauchsprofil über den Tag abzurechnen. Hierdurch sollen Anreize geschaffen werden, den Energiebedarf in Zeiten mit geringer Netzlast zu verlagern. [52]

In [75] wurden durch Auswertung von Smart Meter Daten eine starke Abweichung gemessener Lasten einzelner Haushalte von Standardlastprofilen festgestellt.

Tabelle 11: Forschungsbedarf zu „Charakterisierung der Verbraucher“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Ermittlung von Modellen zur realistischen Darstellung des deutschen Gebäudebestandes inklusive vorhandener Raumwärme- und Warmwassersysteme zur Abschätzung des Effizienzsteigerungspotenzials [56]	X	X			
Messung, Sammlung und Bereitstellung relevanter Daten zur Erstellung von Modellen zur vollständigen modellhaften Darstellung von elektrischen Verbrauchs- und Erzeugungseinheiten (Anlaufströme und -zeiten, Blindleistungsbezug bei Teillast, ggf. Oberschwingungen) [76].		X			

Ermittlung der historischen Entwicklung elektrischer und thermischer Lastprofile und Prognose der Ableitung der Weiterentwicklung dieser für die Zukunft. [75].		X			
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	---	--	--	--

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.9 Speicher in Wohngebäuden

Für eine Lastflexibilisierung ist das Vorhalten dezentraler thermischer und elektrischer Speicher von hoher Relevanz. Da elektrische Speicher aktuell zu teuer für den privaten Einsatz sind und thermische Speicher, speziell Warmwasserspeicher, hohe Verluste aufweisen, sind hier technische Verbesserungen und Effizienzsteigerungen essenziell. Des Weiteren ist die Einbindung der verschiedenen Speicherarten in das Energieversorgungskonzept eines Gebäudes zu untersuchen.

Tabelle 12: Forschungsbedarf zu „Speicher in Wohngebäuden“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Ermittlung der Effizienzstandards und der Kapazität aktuell verbauter thermischer und elektrischer Speicher, auch Ableitung der thermischen Speicherkapazität der verbauten Gebäudemassen (abgeleitet aus eigener Recherche hierzu, um im Weiteren auf das vorhandene Lastflexibilisierungspotenzial von Power-to-Heat abzuleiten).		X			
Untersuchung innovativer Speichermaterialien zur Verminderung von Verlusten und Erhöhung der spezifischen Speicherkapazität sowie Anwendung nicht-kritischer Materialien [77].		X			
Auslegung von thermischen Speichern im Hausenergiesystem (Volumen, Temperatur sowie Raumwärme und Warmwasser kombiniert oder separat) im Spannungsfeld Flexibilität vs. Minimierung von Wärmeverlusten [78], [79].		X			
Ermittlung des Einsatzpotenzials von saisonalen Wärmespeichern in Bestand und Neubau [54].		X	X		

Kostensenkungspotenziale für u. a. elektrochemische Speicher sowie Befreiungsmöglichkeiten von Umlagen für einen systemdienlichen Betrieb [80].			X		
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	---	--	--

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.10 Systemdienliche Lastflexibilisierung

Viele aktuelle Studien untersuchen bereits den Nutzen der systemdienlichen Lastflexibilisierung von elektrischen Verbrauchern in privaten Haushalten ([78], [79], [81]). Viele dieser Untersuchungen basieren auf Simulationen, welche Vereinfachungen beinhalten. Um die Ergebnisse dieser Simulationsergebnisse zu verifizieren, sind zum einen vertiefte Simulationen einzelner Forschungsfragen sowie die Anwendbarkeit der Lastflexibilisierung in der Praxis zu evaluieren.

Tabelle 13: Forschungsbedarf zu „Systemdienliche Lastflexibilisierung“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Untersuchung des potenziellen Beitrages von flexiblen Verbrauchseinheiten und Speichern zur Spannungshaltung, Blindleistungsbereitstellung sowie Rückwirkungen der Lastflexibilisierung in Haushalten auf das Energiesystem abhängig von der gewählten Ladesteuerung (Stromnetze, Kraftwerke, etc.). Ermittlung von Synergien verschiedener flexibler Komponenten [75].		X			X
Netzanschlusskriterien für neue Verbraucher und Erzeuger ausrichten zur Vermeidung von Überschwüngen und Schiefasten, z. B. Anpassung der Phasenanschlusskriterien für steuerbare Verbraucher inklusive einer Unterscheidung zwischen einphasigen und mehrphasigen Komponenten, ggf. abhängig vom Netzanschlusspunkt [78], [79].		X		X	X
Entwicklung eines Konsenses zur Nutzung von Flexibilität trotz der Pluralität der betroffenen Akteure (Netzbetreiber, Stromversorger, Bilanzkreisverantwortlicher). Darauf aufbauend Definition der Rolle des Flexibilitätsaggregators [55], [75].			X	X	

Entwicklung von Anreizsystemen für systemdienliches Ansteuern von Speichern auf Endkundenebene bzw. Vermarktungsmechanismen für Flexibilität, abhängig vom Kundentyp sowie flexible Leistungspreise oder Real Time Pricing [82], [14].				X	
<p><b>Enabler:</b> Nutzen neuer Wärmecontracting-Modelle, ähnlich [83] für die Lastflexibilisierung [55].</p> <p>[83]: Verbraucher zahlt den Wärmebedarf, der aus dem Speicher ausgespeist wird. Die Mehrkosten durch einen erhöhten Wärmeverlust bei Lastflexibilisierung übernimmt der Aggregator. Die Einnahmen aus der Flexibilitätsvermarktung werden zwischen Kunde und Aggregator geteilt.</p>			X	X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

## **4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms**

In diesem Kapitel werden zunächst die im 6. Energieforschungsprogramm festgelegten Forschungsbedarfe für den Sektor private Haushalte dargestellt. Daraufhin werden diese mit den im Rahmen dieses Steckbriefes ermittelten Forschungsbedarfen abgeglichen.

### **4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen**

Während private Haushalte im 6. Energieforschungsprogramms (EFP) nicht explizit als eigener Sektor betrachtet werden, sind verschiedene Themengebiete relevant für den Sektor. Das Thema Quartiere wird hier nicht aufgenommen, da es sich dabei um ein sektorübergreifendes Forschungsgebiet handelt. Übergeordnet lässt sich festhalten, dass im 6. EFP bereits Interdependenzen der Forschungsbereiche und Sektoren unterstrichen werden, z. B. zwischen der solaren Energiegewinnung und den Gebäuden. Zudem wird die notwendige Vergleichsforschung zwischen individuellen, zentralen und Quartiersversorgungskonzepten angesprochen.

Im Folgenden werden im 6. EFP genannte relevante Forschungsthemen für den Sektor pHH nach Themengebiet dargestellt.

#### **Förderthemen zur Reduzierung des Wärmebedarfs**

In Kapitel 3.11 „Energieoptimierte Gebäude und Quartiere – dezentrale und solare Wärmeherzeugung“ wird von einer Schlüsselrolle des Wärmesektors im Prozess der Energiewende gesprochen. Forschung zur ganzheitlichen Optimierung des Gebäudes wird nach Kapitel 3.11.1 (Energieoptimiertes Bauen) gefördert. Alle Komponenten von Dämmung über Erzeugung, Speicherung und Verteilung werden hier abgedeckt sowie ein intelligentes Monitoring und eine Steuerung der Anlagenkomponenten (Betriebsoptimierung). Auch eine Effizienzsteigerung im Bereich der Gebäudetechnik unter Berücksichtigung der Lebenszyklusanalyse und Ressourcenschonung wird gefördert. Für städtische Bereiche werden Projekte zur Förderung der Vernetzung von Akteuren sowie die vertiefende Nutzung integraler Planungsinstrumente gefördert.

#### **Förderthemen zur Energiebereitstellung**

Im 6. EFP werden zum einen aktuell bereits verwendete Technologien mit einem Potenzial zu höherer Effizienz und Marktdurchdringung wie Photovoltaik/Solarthermie (Kapitel 3.2) sowie Wärme- und Kältenetze (Kapitel 3.11.3) genannt. Zum anderen wird die Erforschung potenziell in Zukunft relevanter Technologien wie Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologien (Kapitel 3.7) als relevant eingestuft.

### **Förderthemen zu systemischen Fragestellungen und Lastverschiebung**

In mehreren Themengebieten wird die Optimierung der in Gebäuden eingesetzten Technologien zur Ermöglichung des Lastmanagements angesprochen. Hierzu zählen das Kapitel Energiespeicher (Kapitel 3.8) sowie das Kapitel Systemintegration Erneuerbarer Energien (Kapitel 3.11). Im Bereich Energiespeicher wird neben der Verbesserung der Technik auf Forschungsbedarfe zur Integration von Speichern in die bestehende Gebäudeinfrastruktur und Nutzung von Speichern in Gebäuden zur Entlastung der Versorgungsinfrastruktur verwiesen. Zur Systemintegration der Erneuerbaren Energien werden u. a. Untersuchungen zur Festlegung neuer Netzanschlusskriterien für EE gefördert als auch Methoden zur Verbesserung von Erzeugungsprognosen.

Die übergeordnete Relevanz der IKT und Notwendigkeit von intelligenter Verschaltung der Komponenten wird bereits in der Einleitung unterstrichen. Die Sicherheit der IKT und darüber vermittelter Daten wird unter Kapitel 3.9 (Stromnetze) als förderwürdig eingestuft. Im Kapitel 3.9.2 (Intelligente Netzbetriebsführung) wird zudem die Förderung von „Verfahren, Geräten und Konzepten“ zur Erschließung von Flexibilität erwähnt.

Im Kapitel 3.15 (Systemübergreifende Technologieansätze für die Energiewende) wird auf einen Ideenwettbewerb verwiesen, in welchem verschiedene Förderschwerpunkte gemeinsam betrachtet werden sollen. Unter anderem soll hier die Entwicklung der Energiebedarfsprofile der privaten Haushalte untersucht werden.

### **Förderthemen zur Schaffung von Akzeptanz**

Bereits im Anwendungszweck wird Akzeptanz als Thema von zentraler Bedeutung genannt. Daher ist bei größeren Forschungsprojekten eine begleitende Akzeptanzforschung generell förderfähig. In einigen Kapiteln ist Akzeptanz-Forschung explizit aufgeführt (z. B. CCS).

## **4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs**

Der identifizierte Forschungsbedarf (s. Kapitel 3) wird in diesem Kapitel mit dem Förderbedarf des 6. EFP gespiegelt. Der Förderbedarf beschreibt die notwendige öffentlich finanzierte Forschungsförderung und ist somit eine strategische Auswahl vom notwendigen Forschungsbedarf zur Zielerreichung im Jahr 2050.

### **Förderthemen zur Reduzierung des Wärmebedarfs**

Im 6. EFP wird auf die Optimierung der Gebäudehülle zur Reduzierung des Wärmebedarfs eingegangen. Transformationspfade zur Senkung des Energiebedarfes

in Bestandsgebäuden und die Ermittlung der Grenzen der Sanierfähigkeit des Bestands werden jedoch nicht aufgegriffen.

In Umsetzungsprojekten (Kapitel 3.11.1.2) stehen aktuell Nicht-Wohngebäude im Fokus, was auf Grund abweichender Nutzung und Lastgänge die Anwendbarkeit der Ergebnisse auf Wohngebäude nur eingeschränkt ermöglicht. Ein ähnlicher Kontrast besteht bezüglich der Förderung des Einsatzes von Planungsinstrumenten in Städten. Deren Einsatz sollten zum Teil bereits auf der Gebäudeebene angestrebt werden.

Die Entwicklung effizienter elektrischer Haushaltsgeräte wird im 6. EFP lediglich als Unterpunkt des Forschungsbedarfes im Bereich Industrie und GHD genannt. Zwar führen die hierunter fallenden Geräte aktuell zu lediglich 28 % der Emissionen im Sektor pHH und der hierfür benötigte Strom könnte in Zukunft aus Erneuerbaren Energien bereit gestellt werden. Allerdings ist zu beachten, dass ein zukünftiger Mehrbedarf an Strom auch zu einem Mehrbedarf an Strom aus Erneuerbaren Energien führt. Die nationalen Potenziale zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien sind jedoch aufgrund von Flächenrestriktionen stark beschränkt. Somit ist auch im Bereich pHH die Effizienz von elektrischen Haushaltsgeräten von Relevanz.

### **Förderthemen zur Energiebereitstellung**

Die Nutzung von Biomasse und deren Potenzialeinschränkungen werden im 6. EFP nicht adressiert. Das Thema unterliegt einem anderen Ministerium. Zwar wird im 6. EFP auf die solaren Wärmeerzeuger eingegangen, jedoch weder auf die erforderliche Kaskadierung von verschiedenen Wärmeerzeugern (z. B. Solarthermie mit Wärmepumpe) noch auf den Bedarf von vorzuhaltender Technik für die „Dunkelflaute“.

### **Förderthemen zu systemischen Fragestellungen und Lastverschiebung**

Im 6. EFP wird einer Weiterentwicklung der Netzanschlussregeln mit Fokus auf Erneuerbare Erzeuger angeregt (Kapitel 3.10), aber nicht für Verbraucher wie Wärmepumpen. Des Weiteren wird die Erforschung von Möglichkeiten der Verbesserung der Spannungsqualität im Netz nur zur Integration von Erneuerbaren Energien genannt, aber nicht zur Integration eines erhöhten Stromverbrauchs (zum Beispiel durch Power-to-Heat, Elektromobilität).

Systemsicherheit wird im 6. EFP lediglich als relevanter Punkt für das Thema Stromnetze erwähnt. Dies ist allerdings auch für Gebäude-IKT von höchster Relevanz für die Umsetzbarkeit und Akzeptanz der Nutzung von IKT.

Der Effekt der Gebäude auf die Stadt selber (Stadtklima) und die resultierenden Effekte auf den Energiebedarf der Gebäude werden im 6. EFP nicht erwähnt.

**Förderthemen zur Schaffung von Akzeptanz**

Obwohl begleitende Akzeptanzstudien generell förderfähig sind, wird die Förderung von Akzeptanzstudien zu CCS explizit genannt. Dies wäre ebenfalls für Akzeptanzstudien zur energetischen Sanierung sinnvoll.

Zudem wird die Erforschung von Konzepten zur Erschließung von Flexibilitäten als förderfähig beschrieben. Es wird nicht deutlich, ob hiermit auch konkrete Geschäftsmodelle für Aggregatoren gemeint sind.

## 5 Fazit

Generell besteht eine gute Themenabdeckung zwischen 6. EFP und identifiziertem Forschungsbedarf.

Zur Erreichung der klimapolitischen Ziele besteht noch technischer Forschungsbedarf bezüglich der Umsetzbarkeit von Effizienzmaßnahmen, dem Einsatz Erneuerbarer Energien sowie der Erschließung von Flexibilitäten in Haushalten. Allerdings zeigt sich, dass bereits weitreichende Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und Integration erneuerbarer Energien bestehen. Diese werden jedoch auf Grund von Vorbehalten, Unsicherheiten oder wirtschaftlichen Bedenken nicht umgesetzt.

Speziell der Einsatz von IKT und die Dämmung von Gebäuden können nur umgesetzt werden, wenn die Bevölkerung diese als essenziell für die Energiewende anerkennt. Die Akzeptanzforschung wird begleitend gefördert, sollte aber speziell zur Erreichung von Privatpersonen als eigener Förderschwerpunkt adressiert werden. Zudem sollten IKT-Sicherheit und Versorgungssicherheit im Falle der Dunkelflaute im Förderprogramm stärker hervorgehoben werden.

Da die Verbesserung der energetischen Qualität von Bestandgebäuden ein essenzieller Hebel ist, um die Wärmewende zu vollziehen, ist ein stärkerer Fokus auf den Transformationspfad des Gebäudebestandes hin zu Niedrigenergiegebäuden zu legen.

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Direkte und indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträger und Anwendungsbereich des Sektors private Haushalte in Mio. t für das Jahr 2015 (Methodik aus [7] mit Daten aus [8], [9] und [4]) 5
- Abbildung 2: Sektorale Aufteilung der verbleibenden THG-Emissionen in 2050 nach [35] 14
- Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der gesamten THG-Emissionen abhängig vom Szenario [35]15
- Abbildung 4: Zielkurve des Anteils erneuerbarer Energien an der Endenergiebereitstellung in Abhängigkeit von der Endenergiereduktion [10] 16

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele für Energieanwendungsbereiche in privaten Haushalten	4
Tabelle 2: Anteile der Energieträger am nicht über erneuerbare Energien im Haushalt abgedeckten Endenergiebedarf sowie deren Anteil an den Emissionen [4]6	
Tabelle 3: Untersuchte Energieszenarien mit Zielen und Abkürzungen [35]	11
Tabelle 4: Forschungsbedarf zu „Energetische Sanierung der Gebäudehülle“	18
Tabelle 5: Forschungsbedarf zu „Nachhaltiges Bauen in Planung und Umsetzung“	19
Tabelle 6: Forschungsbedarf zu „IKT und Datenhandhabung“	20
Tabelle 7: Forschungsbedarf zu „Nutzenergiebedarf reduzieren“	21
Tabelle 8: Forschungsbedarf zu „Automatisierte effiziente Energieverteilung durch Smart Buildings/Smart Home“	22
Tabelle 9: Forschungsbedarf zu „Effiziente Energiebereitstellung“	23
Tabelle 10: Forschungsbedarf zu „Direkteinsatz Erneuerbarer Energien“	24
Tabelle 11: Forschungsbedarf zu „Charakterisierung der Verbraucher“	25
Tabelle 12: Forschungsbedarf zu „Speicher in Wohngebäuden“	26
Tabelle 13: Forschungsbedarf zu „Systemdienliche Lastflexibilisierung“	27

## Abkürzungsverzeichnis

CCS	Carbon Capture and Storage
dena	Deutsche Energieagentur
EFP	Energieforschungsprogramm
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KSP	Klimaschutzplan
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LED	Light-Emitting Diode
Mio.	Millionen
t	Tonnen
THG	Treibhausgas
TWh	Terawattstunden
pHH	private Haushalte
WLAN	Wireless Local Area Network
z.B.	zum Beispiel

## Literaturverzeichnis

- [1] Privathaushalt (Haushalt) in: <http://www.bib-demografie.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/P/privathaushalt.html> (Abruf: 17.10.2017). Wiesbaden: Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung, 2017
- [2] Sommer, Christian: Vergleich von Wärmeerzeugern in Privathaushalten - Multikriterielle Bewertung aus Akteurssicht - Masterarbeit an Europa-Universität Flensburg und Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.. Flensburg : Europa-Universität Flensburg, 2017
- [3] 43 Millionen Privathaushalte im Jahr 2035 in: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/02/PD17\\_067\\_122.html;jsessionid=92EF3CB7576059A82F1D9F3095146FE1.I](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/02/PD17_067_122.html;jsessionid=92EF3CB7576059A82F1D9F3095146FE1.I) nternetLive2 (Abruf: 21.11.2017) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6v8xSb0BL>. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2017
- [4] Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und internationale Entwicklung. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017
- [5] Informations- und Kommunikationstechnologie - Schlüsseltechnologie für eine nachhaltige Entwicklung; BMZ-Strategiepapier 2/2013. Berlin: Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, 2013
- [6] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016
- [7] Rasch, M.; Regett, A.; Pichlmaier, S.; Conrad, J.; Greif, S.; Guminski, A.; Rouyrre, E.; Orthofer, C.; Zipperle, T.: Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz - Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems in: BWK Ausgabe 03/2017, S. 38-42. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2017
- [8] Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2015 - Stand: 28.02.2017. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB), 2017
- [9] Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2017

- [10] Hesse, Tilman; Bürger, Veit; Fries, Benjamin; Schlomann, Barbara: Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Gebäudesektor und Stromverbrauch Privathaushalte. Berlin: Öko-Institut e.V., 2016
- [11] Energieeinsparverordnung EnEV 2014 in: <http://www.enev-online.com/>. Berlin: Bundesrepublik Deutschland, 2014
- [12] Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG) in: [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eew\\_rmeg/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eew_rmeg/gesamt.pdf) (14.12.2015). Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Juris GmbH, 2008
- [13] Zweiter Monitoring-Bericht "Energie der Zukunft". Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2014
- [14] dena-Leitstudie Integrierte Energiewende - Zwischenfazit Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2017
- [15] Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969 - 2015. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2016
- [16] Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus; Clausnitzer, Klaus-Dieter: Datenbasis Gebäudebestand – Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), 2010
- [17] Platt, Michael; Exner, Stepha; Bracke, Rolf: Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends. Bochum: GeothermieZentrum Bochum, 2010
- [18] Sperr, Alexander et al.: BWP-Branchenstudie 2015 - Szenarien und politische Handlungsempfehlungen. Berlin: Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2016
- [19] Mikrozensus - Zusatzerhebung 2014 - Bewohnte Wohnungen nach Art der Nutzung, Gebäudegröße, Baujahr und Energieart der Warmwasserversorgung auf Bundeslandebene. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2014
- [20] Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU), 2016

- [21] Stadtquartiere als lokale Impulsgeber für die Energiewende - BMWi und BMBF geben 100 Millionen Euro für ressortübergreifende Forschungsprojekte in:  
URL:<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2017/20170711-gem-pm-stadtquartiere-als-lokale-impulsgeber.html> . (Abruf: 2017-10-11). (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6u8oU1vmq>). Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2017
- [22] Pfaff-Areal wird klimaneutrales Quartier in: URL:<https://www.nachrichten-kl.de/kaiserslautern/item/35866-pfaff-areal-wird-klimaneutrales-quartier>. Accessed: 2017-10-17. (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6uH4jkfxH>). Kaiserslautern: enilon UG, 2017
- [23] Schlömer, Claus: Raumordnungsprognose 2030 - Bevölkerung, private Haushalte, Erwerbspersonen. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2012
- [24] Kwasniewski, Nicolai: So viel kostet Wohnen in Ihrer Stadt - Mieten und Einkommen in: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/immobilien-so-viel-kostet-wohnen-in-ihrer-region-a-1166687.html> (Abruf: 24.11.2017) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6vDIZCm0h>. Hamburg: Spiegel Online GmbH, 2017
- [25] Schwarze, Till: Deutsche Großstädte sind nichts für Geringverdiener in: <http://www.zeit.de/wirtschaft/2012-08/immobilienmarkt-preise-mieten> (Abruf: 24.11.2017) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6vDlvCcWj>. Hamburg : ZEIT ONLINE GmbH, 2012
- [26] Haimann, Richard: Die große Lüge von der Wärmedämmung in: URL:<https://www.welt.de/finanzen/immobilien/article114866146/Die-grosse-Luege-von-der-Waermedaemmung.html>. Abruf: 2017-10-19. (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6uK96Beo1>). Berlin: WeltN24 GmbH, 2010
- [27] KfW hält Wärmedämmung für rentabel in: URL:<http://www.spiegel.de/wirtschaft/service/waermedaemmung-kfw-weist-berichte-zur-prognos-studie-zurueck-a-892362.html>. Abruf: 2017-10-19. (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6uK98Bt31>). Hamburg: Spiegel Online GmbH, 2013

- [28] Böhmer, Michael; Thamling, Nils; Hoch, Markus; Steudle, Gesine: Ermittlung der Wachstumswirkungen der KfW-Programme zum Energieeffizienten Bauen und Sanieren. Basel: Prognos AG, 2013
- [29] Verdrängung ist in Berlin Alltag geworden - Verdrängt: Wie Mieter zum Auszug genötigt werden in: <https://www.berliner-mieterverein.de/magazin/online/mm1012/101212.htm> (Abruf: 24.11.2017) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6vDRAoFYn>. Berlin: Berliner Mieterverein e.V., 2012
- [30] Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz - Ein gutes Stück Arbeit. Mehr aus Energie machen. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2014
- [31] Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien - Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017 . Berlin: Bundesregierung Deutschland, 2016
- [32] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin: Bundesregierung, 2010
- [33] Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende - Die Energie der Zukunft. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2016
- [34] EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050. Brüssel: Europäische Kommission, 2016
- [35] Haller, Markus Dr.; Repenning, Julia; Vogel, Moritz; Schlomann, Barbara Dr.; Reuter, Matthias; Jochem, Eberhard Prof. Dr.; Reitze, Felix Dr.; Schön, Michael; Toro, Felipe Dr.: Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050. Berlin: Öko-Institut e.V., 2016
- [36] Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian: Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose - Projekt Nr. 57/12 - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie . Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2014.
- [37] Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth et al.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht. Berlin: Öko-Institut e.V., 2015
- [38] Klimaschutzszenario 2050 - 1. Modellierungsrunde. Freiburg, Berlin: Öko-Institut e.V., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2014

- [39] Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 2013
- [40] Jochum, Patrick; et.al.: Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden. Berlin: Beuth Hochschule für Technik, 2012
- [41] Wohlfahrt, Katharina; Schломann, Barbara; Jochem, Eberhard; Reitze, Felix; Schön, Michael; Toro, Felipe: Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie. Karlsruhe: Öko-Institut e.V., 2016
- [42] Schulz, Walter; Bartels, Micheal; Gatzen, Christoph; Lindenberger, Dietmar; Müsgens, Felix; Peek, Markus; Seeliger, Andreas; Steuber, Dirk; Wissen, Ralf; Hofer, Peter; Kirchner, Almut; Scheelhaase, Janina; Schlesinger, Michael: Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030 - Energiereport IV. Köln: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), 2005
- [43] Walberg, Dietmar; Holz, Astrid; Gnieschwitz, Timo; Schulze, Thorsten: Wohnungsbau in Deutschland - 2011 Modernisierung oder Bestandsersatz - Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen „Kleinen Wohnungsbaus“. Kiel: Dietmar Walberg, 2011
- [44] Walberg, Dietmar; Gnieschwitz, Timo: Bestandsersatz 2.0 Potenziale und Chancen - Studie zur aktuellen Bewertung des Wohngebäudebestands in Deutschland unter Berücksichtigung von Neubau, Sanierung und Bestandsersatz. Kiel: Dietmar Walberg, 2016
- [45] Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe - Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen. Gräfelfing: FIW München, 2012
- [46] Ebert, Hans-Peter; Büttner, Bastian; Kastner, Ronny; Weismann, Stephan; Weinländer, Helmut; Manara, Jochen; Römer, Constantin; Baumann, Andreas; Reim, Michaela; Beck, Andreas: Technologiebericht 5.1 Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik in: Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Saarbrücken: Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE) , 2017

- [47] Jung, Youngsoo; Joo, Mihee: Building information modelling (BIM) framework for practical implementation in: Automation in Construction 20. London: Elsevier, 2011
- [48] Handbuch Stadtklima - Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2010
- [49] Fadeyi, Moshood Olawale: The role of building information modeling (BIM) in delivering the sustainable building value - Singapore Institute of Technology in: International Journal of Sustainable Built Environment. London: Elsevier, 2017
- [50] Stadtklima – Kommunale Strategien und Potentiale zum Klimawandel in: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/projektkatalog/stadtklima-kommunale-strategien-potentiale> (Abruf:19.10.2017). Berlin: Umweltbundesamt (UBA), 2015
- [51] Günther, Sebastian; Kupfer, Anna; Schöb, Samuel; Tiefenback, Verena; Staake, Thorsten: Einfluss von CO<sub>2</sub>-Kompensationsmaßnahmen und Echtzeit-Feedback auf den Energie- und Wasserverbrauch: Eine Feldstudie am Beispiel des Duschverhaltens. Bamberg: Universität Bamberg, 2017
- [52] IKT für eine erfolgreiche Energiewende - Ausgewählte Anwendungsfelder und politische Handlungsempfehlungen. Oldenburg: EWE AG, 2014
- [53] Energieeffiziente IKT in der Praxis - Planung und Umsetzung von Green IT Maßnahmen im Bereich von Büroarbeitsplätzen und Rechenzentren. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2014
- [54] Giovannetti, Federico; Kastner, Oliver; Lampe, Carsten; Reineke-Koch, Rolf; Park, Sunah; Steinweg, Jan: Technologiebericht 1.4: Solare Wärme und Kälte in: Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Saarbrücken: Institut für ZukunftsEnergieSysteme (IZES) gGmbH, 2017
- [55] Marktrollen und Prozesse beim Einsatz von flexiblen Stromlasten im Energiesystem - dena-Ergebnispapier. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2013

- [56] Kleinertz, Britta; Duffer, Christa; Greif, Simon; Conrad, Jochen: Energieeinsparpotenziale durch die Optimierung bestehender Trinkwassersysteme - Betrachtung von Mietwohnungen und Einfamilienhäusern mit zentralem und dezentralem System. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2017
- [57] Hoffmann, Patrick; Frey, Günther; Friedrich, Malte; Kerber-Clasen, Stefan; Marschall, Jörg; Geiger, Manfred: Forschungsbericht Praxistest „Moderne Energiesparsysteme im Haushalt“. Saarbrücken: IZES gGmbH, 2011
- [58] Tiefenbeck, Verena; Goette, Lorenz; Degen, Kathrin; Tasic, Vojkan; Fleisch, Elgar; Lalive, Rafael; Staake, Thorsten: Overcoming Saliency Bias: How Real-Time Feedback Fosters Resource Conservation in: Management Science. Maryland, USA: Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), 2016
- [59] Rebound-Effekte: Wie können sie effektiv begrenzt werden? Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016
- [60] Tews, Kerstin: Progressive Stromtarife für Verbraucher in Deutschland? - Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 61. Jg. (2011) Heft 10. Frankfurt am Main: etv Energieverlag GmbH, 2011
- [61] Faruqui, Ahmad: Inclining Toward Efficiency - Is electricity price-elastic enough for rate designs to matter? in: Public Utilities Fortnightly 2008. Reston, USA: Public Utilities Reports, 2008
- [62] Geiger, B.; Schwärzer, M.; Arndt, U.; Mühlbacher, H.: Wärmeerzeuger für die Raumheizung und Warmwasserbereitung - Verbundprojekt ISOTEG: Innovative Systeme und optimierte Techniken zur energetischen Gebäudesanierung. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2002
- [63] Geiger, B.; Carter, M.; Mühlbacher, H.: Warmwasserbereitung - Vergleich zentraler und dezentraler Warmwasserversorgung. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2002
- [64] Forschungsprojekt Riem - Wichtige Erkenntnisse für zukünftige Bauvorhaben. München: GEWOFAG Holding GmbH, 2015
- [65] Rahmenbedingungen für effizienten Klimaschutz im Gebäudebereich. München: Industrie-Initiative für effizienten Klimaschutz in Deutschland, 2008

- [66] Gemeinsame Erklärung von BMWi und ZDH zu einer Handwerksinitiative Energieeffizienz. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2016
- [67] Kleinertz, Britta; Samweber, Florian: Auswirkungen der elektrischen Wärmebereitstellung auf Verteilnetze in: Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. Berlin: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2017
- [68] Gerhardt, Norman et al.: Wärmewende 2030 - Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Berlin: Agora Energiewende, 2017
- [69] Contracting - alternative Energiebewirtschaftung in: <https://www.verbraucherzentrale.de/contracting>. (Abruf: 19.10.2017). (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6uKgklOzT>). Düsseldorf: Verbraucherzentrale NRW e.V., 2015
- [70] Gähns, Swantje; Hirschl, Bernd; Aretz, Astrid: Möglichkeiten zur Umgestaltung der EEG-Umlagebasis. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), 2017
- [71] Knebel, Alexander; Kunz, Claudius: Potenziale der Bioenergie. Berlin: Forschungsradar Energiewende, 2014
- [72] Aretz, Astrid; Hirschl, Bernd: Biomassepotenziale in Deutschland - Übersicht maßgeblicher Studienergebnisse und Gegenüberstellung der Methoden. Eberswalde: DENDROM-Koordinationsbüro, 2007
- [73] Pfluger, Benjamin; Tersteegen, Bernd; Franke, Bernd: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2017
- [74] Pehnt, Martin et al.: Primärenergiefaktoren von biogenen Energieträgern, Abwärmquellen und Müllverbrennungsanlagen. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2012
- [75] Eberl, Benedikt; Hinterstocker, Michael; von Roon, Serafin: Von Smart-Meter-Daten zum Netzlastgang in: IEWT 2017 - 10. Internationale Energiewirtschaftstagung Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2017

- [76] Samweber, Florian; Köppl, Simon; et al.: Projekt MONA 2030: Bewertung Netzoptimierender Maßnahmen gemäß technischer, ökonomischer, ökologischer, gesellschaftlicher und rechtlicher Kriterien - Teilbericht Einsatzreihenfolgen. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2017
- [77] Thess, Andre; Trieb, Franz; Wörner, Antje; Zunft, Stefan: Herausforderung Wärmespeicher in: Physik Journal 14. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,, 2015
- [78] Kleinertz, Britta; Gallet, Marc; Müller, Mathias; Samweber, Florian: Optimierung der Netzzrückwirkungen dezentraler Power-to-Heat-Anlagen im Niederspannungsnetz in: Dritte Dialogplattform Power to Heat 2017. Berlin: Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2017
- [79] Kleinertz, Britta; Gallet, Marc; Müller, Mathias; Samweber, Florian; Schmid, Tobias: Load Shifting Potential of Household Power-to-Heat Devices Employing Thermal Storage in: 11th International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2017). Bonn: EUROSOLAR e.V., 2017
- [80] Potentiale elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen (ESPEN) in: Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen - Band 44. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2016
- [81] Gerhardt, Norman et al.: Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050 - Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2015
- [82] Jahn, Andreas; Praetorius, Barbara; Kleiner, Mara Marthe: Netzentgelte in Deutschland - Herausforderungen und Handlungsoptionen. Berlin: Agora Energiewende, 2014
- [83] Das Consolinno Konzept - nachhaltig und zukunftsfähig: kombinierte Strom- und Wärmeversorgung in: CARMEN-Forum 2017 „Sektorkopplung & Wärmenetze – Strategien und Projekte“ am 18. März 2017 in Straubing. Straubingen: Consolinno Energy GmbH, 2017

## Anhang

Direkte und indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträger und Anwendungsbereich des Sektors private Haushalte in Mt für das Jahr 2015 (Methodik aus [7] mit Daten aus [8], [9] und [4])

	<b>Strom</b>	<b>Gas</b>	<b>Öl</b>	<b>Fern- wärme</b>	<b>Kohle</b>	<b>Summe</b>	<b>Prozent</b>
<b>Raumwärme</b>	5,4	47,4	41,3	14,4	4,9	113,4	60,2%
<b>Warmwasser</b>	7,6	8,9	5,0	1,1	-	22,6	12,0%
<b>Prozesswärme</b>	18,6	0,2	-	-	-	18,8	10,0%
<b>Klimakälte</b>	0,6	-	-	-	-	0,6	0,3%
<b>Prozesskälte</b>	14,5	-	-	-	-	14,5	7,7%
<b>Mechanische Energie</b>	11,0	-	-	-	-	11,0	5,8%
<b>IKT</b>	5,4	-	-	-	-	5,4	2,9%
<b>Beleuchtung</b>	2,3	-	-	-	-	2,3	1,2%
<b>Summe</b>	65,4	56,5	46,3	15,5	4,9	188,5	
<b>Prozent</b>	34,7%	30,0%	24,6%	8,2%	2,6%		

## **A.4. Sektorsteckbrief GHD**

# **Sektorsteckbrief**

## **Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)**

### **Strategisches Leitprojekt**

#### **Trends und Perspektiven der Energieforschung**

Teilprojekt:

Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende

(FKZ 03ET4036 X-Z)

#### **Autorinnen und Autoren:**

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner, Patrick Wimmer, Thomas Zipperle

Technische Universität München

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Arcisstraße 21, 80333 München

München, 26.04.2018

**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036 X-Z durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

**Kontakt:**

Prof. Dr.Ing. Ulrich Wagner  
Technische Universität München  
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik  
Arcisstr. 21, 80333 München

**Gefördert durch:**

Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>1 Charakterisierung des Sektors</b> .....	<b>1</b>
1.1 Definition und Abgrenzung.....	1
1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung.....	1
1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen .....	2
<b>2 Herausforderungen für den Sektor</b> .....	<b>4</b>
2.1 Energie- und Klimaziele .....	4
2.2 Energie- und Emissionseinsparungen .....	4
<b>3 Relevanter Forschungsbedarf zur Zielerreichung</b> .....	<b>9</b>
3.1 Energieeffizienz Gebäudehülle .....	9
3.2 Erneuerbare und effiziente Wärmebereitstellung .....	10
3.3 Energieeffiziente Beleuchtungsanlagen .....	11
3.4 Energieeffiziente elektrische Antriebstechnik.....	12
3.5 Energieeffiziente Informations- und Kommunikationstechnik.....	13
3.6 Erneuerbare und effiziente Prozesswärmebereitstellung.....	14
3.7 Energieeffiziente Kältetechnik und Klimatisierung .....	14
3.8 Energieeffiziente Warmwasserbereitstellung .....	15
3.9 Energiemanagement und -speicherung .....	16
<b>4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms</b> .....	<b>17</b>
4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen.....	17
4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs.....	18
<b>5 Fazit</b> .....	<b>19</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>20</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>21</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>22</b>
<b>Literaturangaben</b> .....	<b>23</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>26</b>

# 1 Charakterisierung des Sektors

## 1.1 Definition und Abgrenzung

Der Verbrauchssektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (GHD) wird gegenüber der Industrie entsprechend der von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen veröffentlichten Energiebilanz 2014 für Deutschland wie folgt abgegrenzt: Die Bereiche des produzierenden und verarbeitenden Gewerbes sowie alle Handwerksbetriebe und Betriebe bis 19 Beschäftigte (industrielle Kleinbetriebe) werden dem GHD-Sektor zugeordnet. Hinzu kommen alle Betriebe des Handel- und Dienstleistungsbereichs. Weitere Bereiche des Sektors sind Land- und Forstwirtschaft, welche auch den Gartenbau umfassen, sowie militärische Dienststellen. Außerdem wird der stationäre Energieverbrauch der Deutschen Bahn und der Flughäfen dem Sektor GHD zugeordnet. [1]

## 1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung

Die gesellschaftliche Bedeutung des GHD-Sektors kann anhand der hohen Erwerbstätigenzahlen im Sektor dargestellt werden. Im Jahr 2014 waren 77 % (33,8 Mio. von 44,7 Mio.) der Erwerbstätigen in Deutschland im GHD-Sektor beschäftigt. Die Zusammenstellung dieser Zahlen basiert auf Daten des Statistischen Bundesamtes, Unternehmensregisters und der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung. [2]

Bezogen auf den Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland war der GHD-Sektor in 2014 hingegen mit 414 TWh von 2.536 TWh der kleinste Verbrauchssektor. Dabei blieb der witterungsbereinigte Endenergieverbrauch seit 2005 annähernd konstant. Seit über zehn Jahren deckt der Sektor GHD seinen Endenergiebedarf zu rund 50 % (ca. 133 TWh) über elektrische Energie. Der absolute Strombedarf blieb gegenüber 2005 auf einem konstanten Niveau, ebenso wie der Bedarf von Fernwärme und erneuerbaren Energien (primär Holz). Mineralöle weisen einen rückläufigen Trend von 106 TWh in 2005 auf 81 TWh in 2014 (Reduktion um 23 %) auf. Dieser Verbrauchsrückgang wird durch eine Zunahme in der Nutzung von Erdgas um 20 % kompensiert. [2]

Werden die Emissionen zur Bereitstellung von Strom und Fernwärme nach dem Quellprinzip berücksichtigt, so stammten in 2014 die Hälfte der vom Sektor GHD ausgestoßenen THG-Emissionen aus der energetischen Nutzung von Erdgas. Der Einsatz von Mineralölen verursacht heute hingegen, aufgrund der oben genannten rückläufigen Tendenz, lediglich ein Viertel der CO<sub>2</sub>-Emissionen.[3]

Tabelle 1: Direkte und indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Energieträger und Anwendungsart des GHD-Sektors in Mt für das Jahr 2014 (witterungsbereinigt) [2]

	Strom	Gas	Öl	Fernwärme	Kraftstoffe	Kohle	Summe	Prozent
<b>Raumwärme</b>	3,2	25,2	13,5	8,6	-	0,2	50,7	36,2%
<b>Beleuchtung</b>	28,1	-	-	-	-	-	28,1	20,1%
<b>Mechanische Energie</b>	19,5	0,1	-	-	6,4	-	25,9	18,5%
<b>IKT</b>	12,7	-	-	-	-	-	12,7	9,1%
<b>Prozesswärme</b>	3,9	2,5	0,9	1,2	-	-	8,6	6,1%
<b>Prozesskälte</b>	6,6	-	-	-	-	-	6,6	4,7%
<b>Warmwasser</b>	3,0	1,3	0,9	0,5	-	-	5,7	4,0%
<b>Klimakälte</b>	1,6	0,2	-	-	-	-	1,8	1,3%
<b>Summe</b>	78,7	29,2	15,3	10,4	6,4	0,2	140,1	100%
<b>Prozent</b>	56,2%	20,8%	10,9%	7,4%	4,5%	0,1%	100%	

Der Sektor GHD emittierte direkt und indirekt 140,1 Mt CO<sub>2</sub> (s. Tabelle 1) im Jahr 2014. Der Wert ist um rund 10 % geringer als das Zehnjahresmittel. Diese Reduktion ist jedoch nicht durch einen langfristigen Abwärtstrend bedingt, sondern lediglich durch die milden Temperaturen im Jahr 2014 zu erklären. Grund dafür ist, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Sektor GHD vorrangig (zu rund 36 %) mit der Bereitstellung von Raumwärme zusammen hängen. Dies bewirkt eine starke Temperaturabhängigkeit der Jahresemissionen dieses Sektors. Den zweitgrößten Anteil an den Emissionen verursachte die Beleuchtung mit 20,1 %, gefolgt von der Nutzung mechanischer Energie mit 18,5 %. [3]

### 1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen

Die größten Entwicklungen im GHD-Sektor werden von strukturellen Veränderungen (z.B. der Automatisierung, Digitalisierung, Verlagerungen von Prozessen in andere Sektoren) und von neuen Beleuchtungstechnologien hervorgerufen.

Die steigende Automatisierung im Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen führt bis 2050 zu einer Reduktion der Erwerbstätigen in Deutschland um ca. 10 %. [5] Die rückläufige Beschäftigungszahl einzelner Branchen (z.B. E-Commerce), aber auch alternative Arbeitskonzepte (z.B. Home Office) verringern den Endenergiebedarf (v.a. Raumwärmebedarf) des Sektors. [4]

Außerdem hat die Digitalisierung tiefgreifende Auswirkungen auf die Entwicklung des Sektors. Im Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen erlauben vernetzte Lösungen neben einer höheren Produktivität auch eine höhere Energie- und Ressourceneffizienz. [5, 6]

Eine zunehmende Transformation des Einzelhandels hin zu Logistik, Groß- und Versandhandel wird den Sektor in seiner aktuellen Form verändern. Aus energetischer Sicht führt die Transformation zu einer Reduktion des Energiebedarfs für Raumwärme und Beleuchtung, da die genutzten Flächen abnehmen werden. Dieser Trend im Konsumverhalten wirkt sich zudem auf die Sektoren Verkehr und private Haushalte aus. [7, 8] Weitere strukturelle Veränderungen wird es bei Kleinbetrieben geben. Eine zunehmende Verlagerung der Leistungen dieser Betriebe (z.B. Metzgerei, Bäckerei) in die industrielle Fertigung oder ins Ausland ist absehbar. [8] Diese Entwicklung zeichnet sich auch in der Gastronomie ab, da vermehrt auf „Convenience Food“ (vorgefertigte Lebensmittel) gesetzt wird. Dies führt auch hier zu einem Rückgang des Energiebedarfs in der Nahrungsmittelzubereitung im Sektor GHD und zu einer Verschiebung in den industriellen Bereich. [9]

Einer der größten Trends im Sektor wird von der LED-Technologie im Bereich der Beleuchtung hervorgerufen, welche in 2014 ca. 28 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachte. Der Einsatz von LEDs führt zu vielen neuen Beleuchtungsmöglichkeiten, aber auch zu einer enormen Steigerung der Energieeffizienz. [10]

Generell wird in verschiedenen Energieszenarien das Wirtschaftswachstum des GHD-Sektors gemessen am Bruttoinlandsprodukt (BIP) bei 0,76 % bis 1,03 % pro Jahr bis 2050 angenommen. [4]

## 2 Herausforderungen für den Sektor

### 2.1 Energie- und Klimaziele

Die den GHD-Sektor betreffenden Energie- und Klimaziele aus dem Energiekonzept der Bundesregierung [11] sind in Tabelle 2 dargestellt. Dabei sind die jeweiligen Bezugsjahre und die darauf bezogenen relativen Einsparungen angegeben. Keines der angegebenen Ziele ist alleinig für den GHD-Sektor ausgewiesen, sondern für mehrere bzw. alle Sektoren gültig. Neben den Emissionseinsparungszielen dürfte für den GHD-Sektor das Ziel zur Reduktion des Primärenergiebedarfs der Gebäude um 80 % eine besondere Herausforderung darstellen.

Tabelle 2: Relative Energie- und Klimaziele für den GHD-Sektor [12]

	THG-Emissionen	Energieverbrauch				Endenergieproduktivität
		Primärenergie	Wärmebedarf Gebäude	Primärenergiebedarf Gebäude	Bruttostromverbrauch	
2020	min. -40 %	-20 %	-20 %	-	-10 %	+2,1 % p.a.
2030	min. -55 %	-	-	-	-	
2040	min. -70 %	-	-	-	-	
2050	-80 % bis 95 %	-50 %	-	-80 %	-25 %	
Basisjahr	1990	2008	2008	2008	2008	2008

Eine weitere Detaillierung der Klimaschutzziele wurde im Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung aus dem Jahr 2016 vorgenommen. Hier wurden die bis 2030 einzusparenden THG-Emissionen auf Handlungsfelder verteilt. Allerdings wird der GHD-Sektor nicht speziell ausgewiesen, sondern den „Gebäuden“ (-66 % bis -67 % CO<sub>2</sub>-Emissionen) und der „Industrie“ (-49 % bis -51 %) zugerechnet. [13]

Daher wird in diesem Sektorsteckbrief im Folgenden nicht konkreter auf die Klimaschutzziele des Klimaschutzplans eingegangen.

### 2.2 Energie- und Emissionseinsparungen

Energie- und Klimaziele aus dem Energiekonzept sind nicht sektorspezifisch ausgewiesen. Jeder Sektor hat allerdings eine individuelle Ausgangslage mit besonderen Anforderungen und Eigenheiten. Eine über alle Sektoren gleich verteilte Anwendung der Energie- und Klimaziele aus dem Energiekonzept würde daher ein verzerrtes Bild der bis 2050 geforderten sektoralen Einsparungen zeichnen. An dieser Stelle können bestehende Energieszenarien helfen, zukünftige Entwicklungen abzusehen und die Bandbreite der geforderten Energie- und Emissionsreduktion richtig einzuschätzen. Die in diesem Kapitel

vorgestellten Energieszenarien (s. Tabelle 12 im Anhang) basieren auf der vergleichenden Untersuchung aus [14]. Alle betrachteten Studien erfüllen folgende Kriterien:

- Zeithorizont der Szenarien mindestens bis 2050
- Veröffentlichungsjahr der Studien ab 2012 (nach Veröffentlichung des 6. Energieforschungsprogramms)
- Emissionsminderungsziele, -80 % und -95 % THG-Emissionen, werden abgedeckt
- Alle relevanten Emissionsquellen sind berücksichtigt; gesamtwirtschaftliche Betrachtung mit allen Sektoren

Außerdem werden zur besseren Einordnung der Zahlen zwei Referenzszenarien betrachtet. Diese nehmen dabei an, dass sich die bis zur Veröffentlichung der jeweiligen Studie beobachtete Entwicklung annähernd linear bis 2050 fortsetzt.

### 2.2.1 Endenergie

In Abbildung 1 sind die Ergebnisse der betrachteten Szenarien bzgl. des sektoral einzusparenden Endenergiebedarfs (EEV) zur Erreichung der jeweiligen Emissionsminderungsziele -80 % und -95 % in 2050 dargestellt. Außerdem sind die Ergebnisse der beiden Referenzszenarien abgebildet. Die Verbrauchsreduktion ist in den Szenarien für die verschiedenen Sektoren sehr unterschiedlich ausgeprägt. Ohne gezielte Maßnahmen zu ergreifen, wird in den Referenzfällen im GHD-Sektor 116 TWh/a (29 %) bis 155 TWh/a (39 %) des EEV eingespart. Bis 2050 fordern die Szenarien mit einer Einsparung von ca. 80 % THG-Emissionen im GHD-Sektor eine EEV-Reduktion um 181 TWh/a (bzw. 45,8 %) bis 213 TWh/a (bzw. 54,0 %) und spannen damit einen recht großen Zielkorridor auf. Für eine Emissionsreduktion um 95 % kommen die betrachteten Studien hingegen zu sehr ähnlichen Ergebnissen mit einer EEV-Reduktion um ca. 223 TWh/a (56,6 %). Unabhängig vom Emissionsziel für 2050 muss im GHD-Sektor mehr Endenergie reduziert werden als im Durchschnitt („Gesamt“ in Abbildung 1) aller Sektoren. Das Ziel für den GHD-Sektor muss daher sein, den EEV um mindestens 50 % zu reduzieren.

Die den Szenarienrechnungen zugrunde liegenden Annahmen sehen nach [4] Einsparpotentiale bei der Raumwärme v.a. durch höhere Baustandards und Sanierungsmaßnahmen. Dabei hat der GHD-Sektor vergleichsweise höhere Sanierungsraten, Renovierungszyklen und verstärkte Bauinvestitionen als andere Gebäudebereiche. In Branchen mit hohem Raumwärmebedarf (Banken/Versicherungen, Erziehung und Unterricht, Dienstleistung und Handel) sowie Branchen mit geringem Wirtschaftswachstum (Landwirtschaft, öffentliche Verwaltung) macht sich eine Reduktion des Raumwärmebedarfs deutlicher bemerkbar. Die Energieproduktivität nimmt im GHD-Sektor allgemein zu. Außerdem wird von Effizienzsteigerungen bei Beleuchtung (LED/OLED, Nutzung von Tageslicht) sowie Informations- und Kommunikationstechnik (Mobilgeräte, Monitore und Netzwerktechnik) ausgegangen. Bei letzterer Anwendungsart wird allerdings zudem eine starke Zunahme

der Anzahl an Geräten erwartet, sodass sich die Effizienzsteigerung im EEV bei IKT (Informations- und Kommunikationstechnik) absolut betrachtet nicht bemerkbar machen wird. Weitere Bedarfssteigerungen werden im Bereich des Kühlens und Lüftens gesehen, weswegen im GHD-Sektor v.a. auch Fortschritte bei Klimatisierungstechnologien eine wichtige Rolle spielen werden. [4]

Betrachtet man zusätzlich den Endenergiebedarf nach Energieträgern und die Entwicklung des Strombedarfs, zeigen die Szenarien neben einem fast vollständigen Ausstieg aus fossilen Brennstoffen einen Anstieg des Strombedarfs, der eine zunehmende Elektrifizierung der Anwendungen verdeutlicht [14].

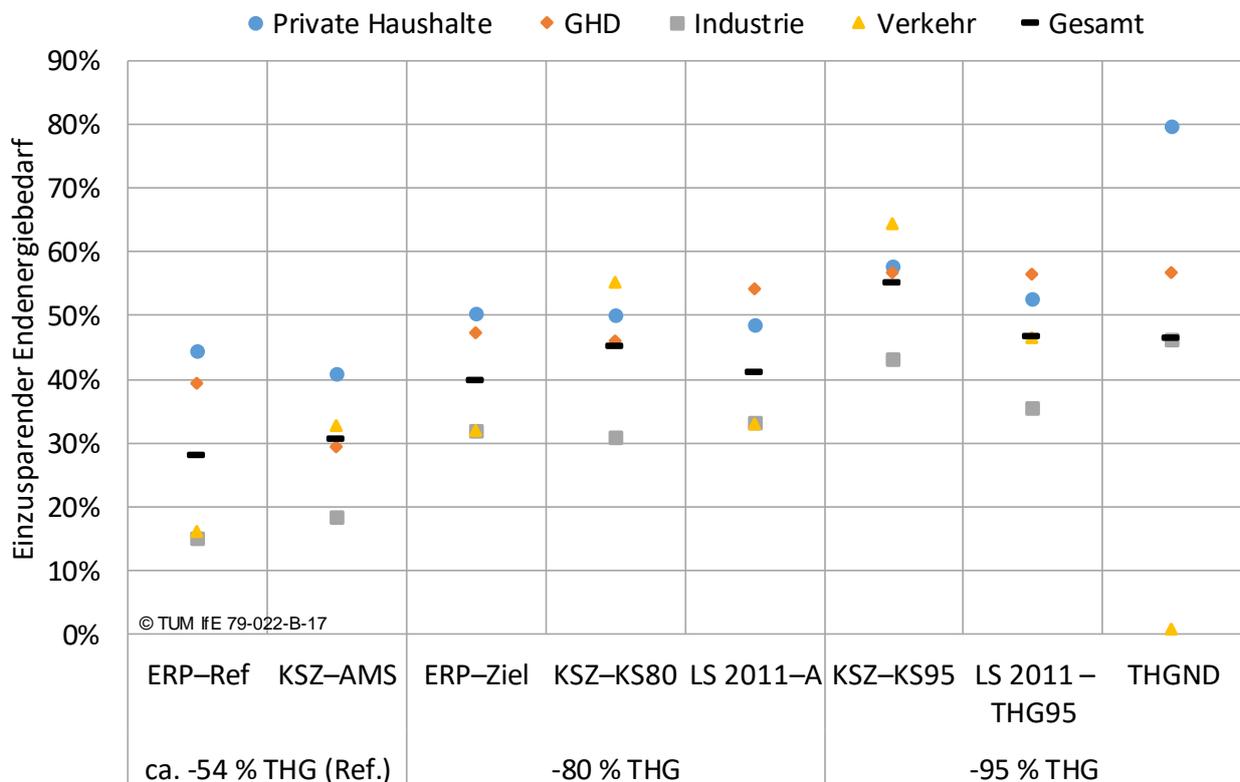


Abbildung 1: Sektorale Aufteilung des einzusparenden Endenergiebedarfs [14]

### 2.2.2 THG-Emissionen

Abbildung 2 zeigt die einzusparenden THG-Emissionen für jeden Sektor und das Gesamtsystem in Prozent für je zwei betrachtete Energieszenarien als Referenzrechnung und mit dem Hintergrund des -80 % bzw. -95 % Emissionsziels. Die Ergebnisse sind dabei stark abhängig von der angewandten Sichtweise der Szenarien, d.h. ob nicht-energiebedingte Emissionen in die Rechnungen miteinbezogen werden oder nicht. Allgemein wird deutlich weniger Einsparpotential in nicht-energiebedingten als energiebedingten THG-Emissionen gesehen [14]:

- „ERP-Ref“: Referenzszenario, das mit -65 % energiebedingten und -55 % gesamten THG-Emissionen die Klimaziele deutlich verfehlt. [15]
- „KSZ-AMS“: Referenzszenario, das mit -63 % energiebedingten und -53 % gesamten THG-Emissionen die Klimaziele deutlich verfehlt. [16]
- „ERP-Ziel“: Gesamt werden trotz -80 % Emissionsziel „nur“ -73 % THG-Emissionen erreicht, da hier nicht-energiebedingte Emissionen nicht als Teil des Klimaziels gesehen werden. Für energiebedingte Emissionen ergibt sich eine Reduktion um -80,2 %. [15]
- „KSZ-KS80“: Hier wird das -80 % Emissionsziel für das Gesamtsystem nahezu exakt erfüllt. Daraus leiten sich -88,2 % energiebedingte Emissionen ab, d.h. alle Energiesektoren müssen übererfüllen. [16]
- „KSZ-KS95“: Energiebedingte Emissionseinsparungen liegen bei -98 %; damit folgen -95 % Emissionen für die Gesamtbilanz. [16]
- „THGND“: Hier wird eine komplette Einsparung energiebedingter Emissionen gefordert, um eine Gesamteinsparung von -95 % zu erreichen. [17]

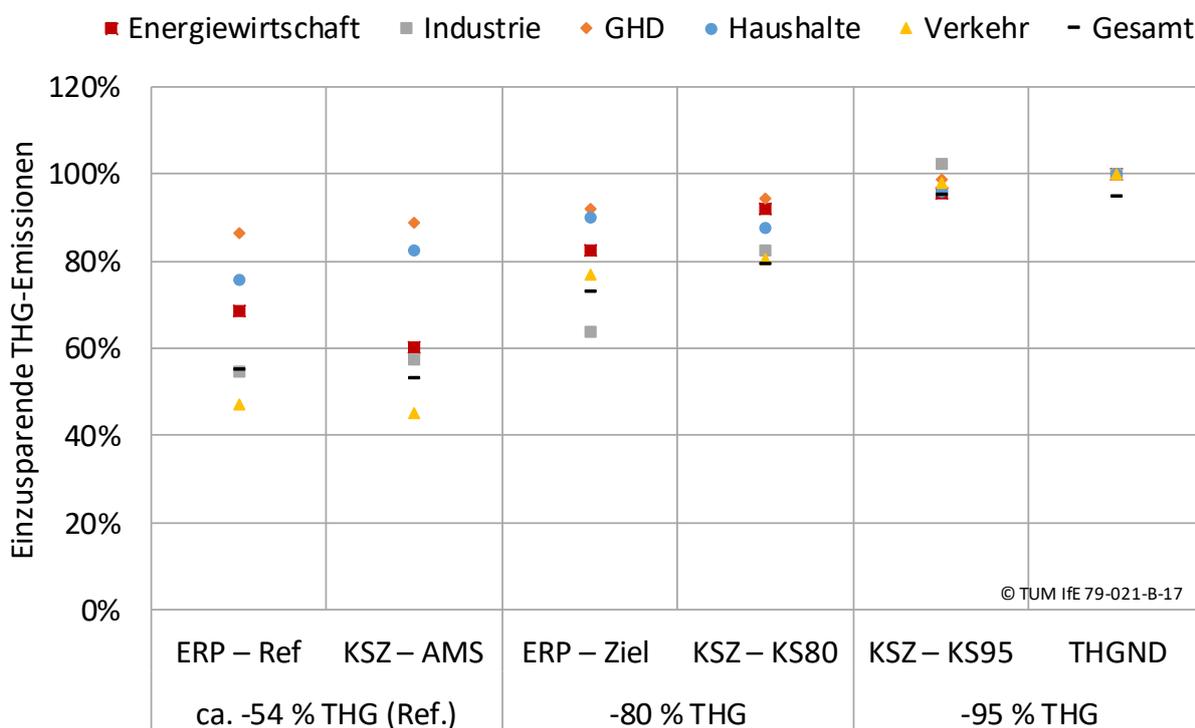


Abbildung 2: Sektorale Aufteilung der einzusparenden THG-Emissionen in 2050 [14]

Konkret für den GHD-Sektor weist Abbildung 2 bis zum Jahr 2050 in den Szenarien mit -80 % THG-Emissionen eine Reduktion von im Mittel -83 Mio. t CO<sub>2</sub>-äquivalent/a (-93 %), in Szenarien mit -95 % THG-Emissionen von -89 Mio. t CO<sub>2</sub>-äquivalent/a

(-100 %) aus. Ziel ist somit, die THG-Emissionen im GHD-Sektor fast komplett zu reduzieren. Außerdem ist zu erkennen, dass der GHD-Sektor unabhängig vom betrachteten Szenario gegenüber den anderen Sektoren übererfüllen muss, d.h. hier müssen mehr Emissionen als im vorgegebenen Klimaziel eingespart werden. Daraus lässt sich ableiten, dass jede Energieanwendungsart möglichst auf THG-neutrale Technologien umgestellt werden muss. Vor allem bei den dominierenden Anwendungsarten Raumwärme und Beleuchtung muss damit großer Handlungs- und Forschungsbedarf ausgewiesen werden. [14]

### 3 Relevanter Forschungsbedarf zur Zielerreichung

Aufgrund der Heterogenität des GHD-Sektors wurde die ganzheitliche Identifikation des relevanten Forschungsbedarfs zur Erreichung der Klimaziele nach den acht Energieanwendungsarten der Energiebilanz durchgeführt. Darüber hinaus wurde für den Sektor GHD Forschungsbedarf im Bereich Energiemanagement und -speicherung identifiziert. Die Gliederung des Kapitels (bzw. des Forschungsbedarfs) erfolgt nach den Anteilen der jeweiligen CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb des Sektors (s. Tabelle 1) und wird mit dem Querschnittsthema Energiemanagement und -speicherung abgeschlossen.

#### 3.1 Energieeffizienz Gebäudehülle

Raumwärme spielt unter den Anwendungsarten des GHD-Sektors hinsichtlich des Endenergiebedarfs die größte Rolle und ist mit etwa 36 % für über ein Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Sektors verantwortlich (s. Tabelle 1). Um einerseits dem Ziel, den Primärenergiebedarf von Gebäuden um 80 % zu senken (s. Tabelle 2), und andererseits der in den Szenarien aus Tabelle 12 geforderten Übererfüllung (s. Kapitel 2.2) des GHD-Sektors Rechnung zu tragen, sind Maßnahmen in Bezug auf die Gebäudehülle von zentraler Bedeutung. Daher liegt der Fokus des in Tabelle 3 ausgewiesenen Forschungsbedarfs vor allem auf energieoptimiertem Bauen und Gebäudesanierung, auch aufgrund der verhältnismäßig hohen Sanierungsraten in diesem Sektor [4].

Tabelle 3: Forschungsbedarf zu „Energieeffizienz Gebäudehülle“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Entwicklung von schlanken Hochleistungsdämmstoffen im Hinblick auf Kosten, Nachhaltigkeit (niedriger Energieaufwand, lange Lebensdauer) und Ökologie (mineralische, pflanzliche Stoffe) für die Altbausanierung. Der Fokus liegt auch auf der Multifunktionalität (wärmedämmend und wärmespeichernd) dieser Dämmstoffe. [18, 19]	X	X	X		
Ressourcenschonendes Bauen durch Entwicklung von Membrankonstruktionen zur Steigerung der Energieeffizienz (Steuerung des solaren Energieeintrages, optimierte thermische und optische Eigenschaften) sowie von energieeffizienten Komponenten mit hoher Recyclingfähigkeit. [19]	X	X			

(Weiter-)Entwicklung von transparenten bzw. transluzenten Elementen: schaltbare Elemente (veränderliche Eigenschaften z.B. Isolierglas mit anpassbarem g-Wert) insbesondere bei gut gedämmten Gebäuden, Hybridsysteme (Tages- und Kunstlicht kombiniert). [19, 20]		X			
Entwicklung funktioneller optischer Oberflächen (spektral-selektive low-e Schichten) zur Verminderung von Wärmedurchgangskoeffizienten sowie von Heiz- und Kühlenergie. [19]		X			
Integration multifunktionaler Komponenten in die Gebäudehülle (Weiterentwicklung und Kostenreduktion): z.B. Wärmespeicher (u.a. PCM) und gebäudeintegrierte Photovoltaik und Solarthermie. [19]		X	X		X
Entwicklung von Sanierungsleitfäden (auch Neubau), um sicher zu stellen, dass jedes individuelle Sanierungsprojekt energetisch und wirtschaftlich optimiert werden kann (komplette Sanierungsmaßnahme betrachten, nicht nur einzelne Bereiche für sich optimieren). [18]			X	X	
Ganzheitliche Gebäudesimulation zur Beurteilung neuer Komponenten hinsichtlich des Einsatzes im Neu- und Altbau (z.B. Systemanalyse des Wärmespeicherpotentials der Gebäudehülle). [19]		X			X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.2 Erneuerbare und effiziente Wärmebereitstellung

In Ergänzung zur Maßnahme, den Raumwärmebedarf durch Sanierung der Gebäudehülle zu verringern, ist für eine Reduktion des Primärenergiebedarfs auch eine möglichst erneuerbare und effiziente Wärmebereitstellung nötig. 2014 wurde Raumwärme noch vorwiegend über fossile Brennstoffe bereitgestellt (> 75 % Anteil an CO<sub>2</sub>-Emissionen bzgl. Raumwärme, s. Tabelle 1). Daher zielt der identifizierte Forschungsbedarf hauptsächlich auf Wärmeerzeuger ab, die entweder direkt lokale regenerative Energien (z.B. Solarthermie) nutzen können oder mit erneuerbar erzeugten Energieträgern (z.B. Strom) arbeiten. Somit wird in Folge sinkender Primärenergiefaktoren der Primärenergiebedarf für Raumwärme gesenkt.

Tabelle 4: Forschungsbedarf zu „Erneuerbare und effiziente Wärmebereitstellung“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Wärmepumpe: Systemische Weiterentwicklung: Verbesserung Jahresarbeitszahl, Kostenreduktion, Integration in Lastmanagementsysteme. [21]			X		X
Wärmepumpe: Weiterentwicklung Komponenten: Kältemittel (natürliche Kältemittel), Abdeckung höherer Temperaturniveaus, Optimierung Verdichter für höhere Betriebsdrücke, Anlagendesign (Wärmetauscher, Kühltechniken verbessern). [21, 22]	X	X	X		
Solarthermie: Weiterentwicklung von Kollektortechnologien (z.B. Solarluftkollektoren, photovoltaisch-thermische Hybridkollektoren, Kollektoren mit Wärmespeicherfunktion, Einsatz in Wärmepumpensystemen). [23]		X			
Wärmespeicher: Reduktion der Wärmeverluste, Erhöhung des Speichervermögens durch optimierte Speichermaterialien, Konzepte zur Nutzung der Gebäudemasse, alternative thermische Speicherkonzepte (PCM, thermo-chemische/thermo-physikalische Speicher). [19, 23]		X			X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.3 Energieeffiziente Beleuchtungsanlagen

Die Beleuchtung nimmt Platz zwei der Emissionen des GHD-Sektors ein und wird ausschließlich über Strom bereitgestellt (s. Tabelle 1). Eine Reduktion des Primärenergiebedarfs kann daher sowohl über einen höheren Anteil erneuerbarer Energien am Strommix im Umwandlungssektor als auch über Effizienzsteigerung der Beleuchtungsanlagen herbeigeführt werden. Letztere können hauptsächlich über technische und wirtschaftliche Fortschritte bei LED-Beleuchtungssystemen erreicht werden.

Tabelle 5: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente Beleuchtungsanlagen“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Gesamteffizienz von LED-Beleuchtungssystemen verbessern (LED, Optik, Elektronik, Kühlung, Gehäuse etc.). Es müssen sowohl die Einzelkomponenten, als auch das Gesamtsystem verbessert werden. [24]		X			

Kommunale Beleuchtung, Straßenbeleuchtung, allgemeine öffentliche Beleuchtung durch wirtschaftliche Anreize auf LED-Technologie umstellen. [25]			X	X	
Untersuchung und Adressierung des Rebound-Effektes (Mehrverbrauch der Nutzer bei reduziertem Energieverbrauch der Komponenten). [19, 26]				X	
Materialforschung hinsichtlich Vermeidung von Schwermetallen bei OLED (organische LED). [19]	X				
Weiterentwicklung von wirtschaftlichen Verfahren des Recyclings von LEDs zur Rückgewinnung von Materialien (u.a. seltene Erden). [27]	X		X		X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.4 Energieeffiziente elektrische Antriebstechnik

Mechanische Energie vereinte in 2014 fast 26 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen im GHD-Sektor auf sich (s. Tabelle 1). Neben Elektromotoren ist ein Viertel dieser Menge auf kraftstoffbetriebene Motoren zurückzuführen. Zusätzlich zur Elektrifizierung dieser Komponenten besteht Forschungsbedarf daher besonders darin, Energieeinsparpotentiale der Anlagen zu identifizieren und Hocheffizienzmotoren zu entwickeln.

Tabelle 6: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente elektrische Antriebstechnik“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Identifikation der Energieeinsparpotentiale von Anlagen mit elektrischen Antrieben (Systemanalyse, Ergebnisse in Leitfäden aufarbeiten). [28]	X			X	X
Unternehmen über Einsparpotentiale aufklären (z.B. Optimierung der Steuerung/Regelung bei häufigen Lastschwankungen). [28 bis 30]				X	X
Weiterentwicklung von Hocheffizienzmotoren hinsichtlich Effizienz im Nenn- und Teillastbetrieb. [21, 28, 31]		X			

Weiterentwicklung von Elektromotorkomponenten: Hochtemperatursupraleitung, Reduktion des Einsatzes von seltenen Erden (v.a. Permanentmagnete), optimierte Komponenten für kleine Leistungsklassen zur Effizienzsteigerung. [21]	X	X			
Intelligente Integration von Elektromotoren ins Gebäudesystem zur unabhängigen Betriebsoptimierung unter Demand Side Management Aspekten. [21]		X			X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.5 Energieeffiziente Informations- und Kommunikationstechnik

Die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) spielt bereits heute eine wichtige Rolle bei der Digitalisierung des GHD-Sektors. Die zunehmende Vernetzung und die damit verbundene Steigerung an Rechenleistung, Datenspeicherung und Kommunikationsaufkommen führen womöglich zu einer Erhöhung des zukünftigen Endenergiebedarfs. Um die CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Bereich (2014: über 12 % der Emissionen im Sektor GHD, s. Tabelle 1) gering zu halten bzw. eventuell sogar zu senken, sind Effizienzsteigerungen und ein sinnvolles Verhalten der Nutzer unabdingbar.

Tabelle 7: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente Informations- und Kommunikationstechnik“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Ressourcenschonende, umweltfreundliche und nachhaltige Produktion von IKT-Hardware und deren Komponenten. [32]	X	X			
Steigerung der Effizienz von Rechenzentren (z.B. Nutzung von Grundwasserkälte zur Kühlung, Nutzung der Abwärme). [32]	X	X			
Steigerung der Effizienz von elektrischen Geräten und Aufklärung bezüglich sinnvollen Einsatzes. [19, 32]		X			X
Weiterentwicklung der verschiedenen Konzepte des Energiemonitorings (z.B. intelligentes und automatisiertes Auswerten, simultanes Monitoring). [19]		X	X		

Entwicklung von vereinheitlichten und standardisierten Kommunikations- und Übertragungsprotokollen. [19]		X				X
----------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	---	--	--	--	---

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.6 Erneuerbare und effiziente Prozesswärmebereitstellung

Tabelle 1 weist in 2014 für die prozesswärmebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen einen Anteil der Emissionen im GHD-Sektor von ca. 6 % aus, wovon knapp 40 % auf die Verbrennung fossiler Energieträger entfielen. Um diese Emissionen zu reduzieren, muss vor allem der Einsatz von erneuerbaren Energien zur Prozesswärmeerzeugung genauer untersucht werden.

Tabelle 8: Forschungsbedarf zu „Erneuerbare und effiziente Prozesswärmebereitstellung“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit solarthermisch unterstützter Systeme. [23]		X	X		
Standardisierung für Integration und Regelung von Anlagen zur Erzeugung solarer Prozesswärme (z.B. Konzepte für kosten- und zeiteffiziente Installation großer Anlagen). [23]			X	X	
Untersuchung und Demonstration an/von hybriden Systemen (z.B. Wärmepumpen, Abwärme, KWK). [23]		X			
Entwicklung einer Strategie zur flächendeckenden THG-armen Prozesswärmeerzeugung bis 2050 mittels solarer Prozesswärme. [23]	X	X			

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.7 Energieeffiziente Kältetechnik und Klimatisierung

Die Erzeugung von Prozesskälte zeigt sich mit knapp 5 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Sektor GHD (s. Tabelle 1) für einen relativ geringen Teil verantwortlich. Da in den Szenarioergebnissen aus Kapitel 2.2 jedoch eine Übererfüllung des GHD-Sektors hinsichtlich des

THG-Ausstoßes gefordert wird (s. Abbildung 2), stehen Effizienzsteigerungen bei der Kälteerzeugung und -speicherung im Vordergrund des Forschungsbedarfs.

Klimakälte war 2014 das Schlusslicht im GHD-Sektor mit den geringsten THG-Emissionen aller Anwendungsarten, allerdings wird zukünftig laut der Szenarien aus Tabelle 12 ein steigender Nutzenergiebedarf (Kältebedarf) erwartet. Um den dafür notwendigen Endenergiebedarf möglichst gering zu halten, liegt der Fokus besonders auf einer Optimierung der Effizienz bei der Erzeugung und Verteilung von Klimakälte.

Tabelle 9: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente Klimatisierung und Kältetechnik“

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Entwicklung niederexergetischer Systemkonzepte auf Grundlage von Umweltwärme (z.B. Solarthermie). [19]		X			
Steigerung der Umwandlungseffizienz von Ab- und Adsorptionskältemaschinen. [23, 33, 34]		X	X		
Entwicklung von gasbetriebenen Sorptionswärmepumpen für hohe Temperaturhübe und niedertemperierte Umweltwärmequellen. [23]		X			
Material- und Systemforschung an Phasenwechsel- und thermochemischen Speichern. [19, 23]		X			
Optimierung von Komplettsystemen (z.B. Regelstrategien, Monitoring). [19]		X			

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.8 Energieeffiziente Warmwasserbereitstellung

Die Warmwasserbereitstellung verursacht nur einen Anteil von 4 % der auf den GHD-Sektor zurückzuführenden CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche fast zur Hälfte auf die Verbrennung von Gas und Öl zurückzuführen sind. Ziel muss somit auch hier sein, durch Effizienzsteigerung und Elektrifizierung – ein möglichst THG-armer Strommix vorausgesetzt – eine Emissionsreduktion zu erreichen.

Tabelle 10: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente Warmwasserbereitstellung“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Geregelte elektrische Durchlauferhitzer müssen technisch weiterentwickelt und mittels öffentlicher Aufklärung weiter etabliert werden. Zudem müssen regulatorische Hemmnisse für den Einsatz im Neubau abgebaut werden. [35]		X		X	
Reduzierung von Systemverlusten sowie Konzeptionierung und Erprobung von Low-Ex-Systemen im Gebäude und Wärmenetz. [23]	X	X			

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.9 Energiemanagement und -speicherung

Rein über die Anwendungsarten können nicht alle relevanten Maßnahmen des GHD-Sektors abgedeckt werden. Das Thema Energiemanagement und -speicherung spielt hierbei eine wichtige sowie zukunftsweisende Rolle, daher ist es als Querschnittsthema anzusehen. Die Elektrifizierung des GHD-Sektors wird für ein erfolgreiches Erreichen der Klimaziele von entscheidender Bedeutung sein. Bereits 2014 entfielen mehr als 56 % der sektorspezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf strombasierte Anwendungen (s. Tabelle 1).

Tabelle 11: Forschungsbedarf zu „Energiemanagement und -speicherung“

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Energiemanagement: Optimierte Steuer- und Regelungskonzepte (Sektorkopplung Strom, Wärme/Kälte, Mobilität) im Gebäudesystem für Maximierung solarer Deckungsanteile und Smart Grid Fähigkeit. [19, 22, 23, 36]		X	X		X
Stromspeicher: Zyklenfestigkeit verbessern, Weiterentwicklung von Redox-Flow-Batterien und Superkondensatoren für Gebäude. [19]		X			X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

## 4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms

Das 6. Energieforschungsprogramm (EFP) wurde 2011 auf das damalige Energiekonzept der Bundesregierung zugeschnitten und hat seinerzeit wichtige Leitplanken zur Gestaltung der beginnenden Energiewende gesetzt. Es wurden neue strategische Wege in allen Handlungsfeldern mit einer großen Bandbreite förderfähiger Technologien beschritten.

In diesem Kapitel wird eine Bestandsaufnahme relevanter Themen für den GHD-Sektor im 6. EFP durchgeführt. Darauf aufbauend wird eine Spiegelung der Themen aus dem Jahr 2011 mit dem identifizierten Forschungsbedarf (s. Kapitel 3) durchgeführt.

### 4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen

Das 6. EFP und die darin adressierte Forschungsförderung sind vorwiegend nach den Ressorts der Bundesministerien BMWi, BMU, BMELV und BMBF gegliedert. Der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen wird im Abschnitt des BMWi an zwei verschiedenen Stellen thematisiert. Zum einen wird er im Zusammenhang mit der Industrie als sog. IGHD erwähnt, wobei vor allem der Energieeinsatz eine Rolle spielt. Zum anderen lassen sich Inhalte der Kapitel „Energieeffizienz im Gebäudebereich und Energieoptimiertes Bauen“ und „Energieeffiziente Stadt und dezentrale Energiesysteme“ dem GHD-Sektor zuweisen. Dabei wird dieser dort zwar nicht namentlich genannt, aber laut der in Tabelle 1 ausgewiesenen Anwendungsarten sowie deren THG-Emissionen ist Raumwärme und damit verbunden das Gebäude von großer Bedeutung für den Sektor. Im Folgenden werden relevante Förderthemen aus diesen beiden Kategorien gelistet [37]:

#### Förderthemen aus dem Bereich IGHD

Energieeffizienz bei Verbrauch und dezentraler Erzeugung:

- Hocheffiziente Elektromotoren
- Optimierung strombasierter Wärme- und Kälteerzeugung
- Effiziente elektrische Hausgeräte
- Neue Anlagen-, Generatoren- und Thermoelektrik-Konzepte zur effizienten dezentralen Stromerzeugung kleiner Leistung (bis ca. 10 MW)
- Neue Technologien und Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung

Effizienter Einsatz von Strom und Abwärme, Energiemanagement:

- Neue Technologien zur Nutzung von Abwärme (Hochtemperaturwärmepumpen, Wärmespeicher, ORC)
- Kälte- und Wärmeerzeugung mit Kompression, Adsorption und Absorption
- Energie- und Demand-Side-Management-Systeme

## **Förderthemen aus dem Bereich Gebäude**

Energieeffizienz und Energieoptimiertes Bauen:

- Optimierte Gebäudehülle (Wärme- und Sonnenschutz, Luftdichtigkeit, thermische Speicherkapazität)
- Effiziente Systeme für Bautechnik und technische Gebäudeausrüstung (Wärmerückgewinnung, Niedrig-Exergie-Systeme)
- Integration erneuerbarer Energien (Solarenergie, oberflächennahe Geothermie)
- Betriebsoptimierung der eingebauten Systeme in Abstimmung mit dem Nutzungskonzept

Dezentrale Energiesysteme:

- Dezentrale Energieversorgungstechnologien primärenergetisch, wirtschaftlich und ökologisch verbessern (KWK, Wärme-/Kälteerzeugung, Wärmetauscher, Rohrleitungs- und Verlegungstechnik, LowEx-Hausübergabestationen, Wärmeträgermedien, Gebäudetechnologien, optimierte Betriebsweisen, Gesamtsystemoptimierung)
- Dezentrale Einspeisung in Wärmenetze
- Thermische Speicherung (technologische Entwicklung, Optimierung Systemintegration)
- Einsatz von Groß-Wärmepumpen
- Verbesserung Mikro-KWK
- Möglichkeiten zur Betriebsoptimierung mit Hilfe von IKT

## **4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs**

Der identifizierte Forschungsbedarf wird in diesem Kapitel mit dem Förderbedarf des 6. EFP gespiegelt. Bei diesem Vergleich muss Folgendes beachtet werden: Hierbei handelt es sich um einen Vergleich von Förderbedarf (Inhalt 6. EFP) und Forschungsbedarf (für den Sektor GHD identifiziert s. Kapitel 3). Der Förderbedarf beschreibt die notwendige öffentlich finanzierte Forschungsförderung und ist somit eine strategische Auswahl des notwendigen Forschungsbedarfs zur Zielerreichung im Jahr 2050.

Folgende Inhalte werden im 6. EFP für den Sektor GHD identifiziert, welche nicht als Forschungsbedarf in Kapitel 3 ausgewiesen werden: effiziente elektrische Hausgeräte und dezentrale Einspeisung in Wärmenetze.

Diese identifizierten Unterschiede sind verhältnismäßig gering, weswegen von einer guten Themenabdeckung zwischen 6. Energieforschungsprogramm (2011) und identifiziertem Forschungsbedarf (2017) gesprochen werden kann.

## 5 Fazit

Für den Sektor GHD sind weder im Energiekonzept der Bundesregierung noch im Klimaschutzplan 2050 konkrete, sektorspezifische Energie- und Klimaziele ausgewiesen. Daher muss sich der Sektor an den globalen Zielen zu Endenergiebedarf und THG-Emissionen orientieren. Unterstützend können an dieser Stelle die diversen Energieszenarien wirken, um den zukünftigen Zielpfad des Sektors einordnen zu können. Laut dieser Energieszenarien wird für den GHD-Sektor eine gewisse Übererfüllung der Ziele gegenüber den anderen Sektoren gefordert. Dies muss beim Forschungsbedarf berücksichtigt werden.

Die Identifikation der Maßnahmen zum Forschungsbedarf erfolgte anhand der Anwendungsarten, ergänzt um das Thema Energiemanagement und -speicherung. Die relevanten Forschungsschwerpunkte für den GHD-Sektor werden überwiegend bereits im 6. Energieforschungsprogramm abgedeckt und gliedern sich wie folgt:

- Elektrifizierung, insbesondere auch der Raumwärmeanwendungen, z.B. mit Wärmepumpen, bei gleichzeitiger Einbindung von erneuerbaren Energien und Brennstoffe in die Energiebereitstellung
- Ressourcen- und Energieeffizienz: hohe Sanierungsrate und -tiefe bei Gebäuden, Einsatz von hocheffizienten Motoren und Leuchtmitteln
- Betrachtung des Gesamtsystems und Sektorkopplung von Strom, Wärme und Kälte, z.B. Demand-Side-Management

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Sektorale Aufteilung des einzusparenden Endenergiebedarfs .....	6
Abbildung 2: Sektorale Aufteilung der einzusparenden THG-Emissionen in 2050.....	7

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Direkte und indirekte CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Energieträger und Anwendungsart des GHD-Sektors in Mt für das Jahr 2014 (witterungsbereinigt) .....	2
Tabelle 2: Relative Energie- und Klimaziele für den GHD-Sektor .....	4
Tabelle 3: Forschungsbedarf zu „Energieeffizienz Gebäudehülle“ .....	9
Tabelle 4: Forschungsbedarf zu „Erneuerbare und effiziente Wärmebereitstellung“ .....	11
Tabelle 5: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente Beleuchtungsanlagen“ .....	11
Tabelle 6: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente elektrische Antriebstechnik“ .....	12
Tabelle 7: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente Informations- und Kommunikationstechnik“ .....	13
Tabelle 8: Forschungsbedarf zu „Erneuerbare und effiziente Prozesswärmebereitstellung“ .....	14
Tabelle 9: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente Klimatisierung und Kältetechnik“ ...	15
Tabelle 10: Forschungsbedarf zu „Energieeffiziente Warmwasserbereitstellung“ .....	16
Tabelle 11: Forschungsbedarf zu „Energiemanagement und -speicherung“ .....	16
Tabelle 12: Untersuchte Energieszenarien mit Zielen und Abkürzungen .....	26

## Abkürzungsverzeichnis

BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMLEV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
EEV	Endenergieverbrauch
EFP	Energieforschungsprogramm
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GPR	Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte
IGHD	Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KUR	Klima, Umwelt und Ressourcen
KWK	Kraft Wärme Kopplung
LED	Leuchtdiode
Low-Ex	Low exergy
OLED	Organische Leuchtdiode
ORC	Organic Rankine Cycle
PCM	Phase Change Material
T	Technische Aspekte
THG	Treibhausgas
V	Versorgungssicherheit
W	Wirtschaftliche Aspekte

## Literaturangaben

- [1] Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013, Schломann, B., Wohlfarth, K., Kleeberger, H., Hardi, L., Geiger, B., Pich, A., Gruber, E., Gerspacher, A., Holländer, E. u. Roser, A., 2015
- [2] Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014. Climate Change, Kemmler, A., Straßburg, S., Seefeldt, F., Anders, N., Rohde, C., Fleiter, T., Aydemir, A., Kleeberger, H., Hardi, L. u. Geiger, B., Berlin 2017
- [3] Rasch, M., Regett, A., Pichlmair, S., Conrad, J., Greif, S., Guminski, A., Rouyrre, E., Orthofer, C. u. Zipperle, T.: Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz. Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems. bwk 2017 3, S. 38–42
- [4] Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie, Institut für angewandte Ökologie, Fraunhofer ISI u. Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Karlsruhe 2016
- [5] Demary, V., Engels, B., Röhl, K.-H. u. Rusche, C.: Digitalisierung und Mittelstand. Eine Metastudie. IW-Analysen, Nr. 109. Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Medien GmbH 2016
- [6] Graumann, S. u. Bertschek, I.: Monitoring-Report. Wirtschaft Digital 2017, Berlin 2017
- [7] Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management. Chancen der digitalen Transformation, Kersten, W., Seiter, M., See, B. von, Hackius, N. u. Maurer, T., Bremen 2017
- [8] E-Commerce-Strategien für den mittelständischen Einzelhandel. Stand – Prognosen – Empfehlungen, Seidenschwarz, H., Weinfurter, S., Stahl, E. u. Wittman, G., 2014
- [9] Handelsreport Lebensmittel. Fakten zum Lebensmitteleinzelhandel, Handelsverband Deutschland, Berlin 2015
- [10] Lighting the way. Perspectives on the global lighting market, Baumgartner, T., Wunderlich, F., Wee, D. u. Jaunich, A., 2012
- [11] Energiekonzept. für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin 2010
- [12] Die Energie der Zukunft. Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin 2016
- [13] Klimaschutzplan 2050, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin 2016

- [14] Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050, Institut für angewandte Ökologie, Fraunhofer ISI u. Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Berlin 2016
- [15] Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln u. Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung, Basel, Köln, Osnabrück 2014
- [16] Klimaschutzszenario 2050. 2. Modellierungsrunde, Öko-Institut e.V. u. Fraunhofer ISI, Berlin 2015
- [17] Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Dessau-Roßlau 2014
- [18] Sprengard, C. Dipl.-Ing., Treml, S. Dr.-Ing. u. Holm, A. H. Prof.-Dr. Ing.: Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen, Gräfelfing 2013
- [19] Technologien für die Energiewende. Technologiebericht 5.1 Energie und Ressourceneffizienz Gebäude, Ebert, H.-P., Büttner, B., Kastner, R., Weismann, S., Weinländer, H., Manara, J., Römer, C., Baumann, A., Reim, M. u. Beck, A., Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken 2017
- [20] Institut für Wärmetechnik TU Graz: Passive Sonnenenergienutzung, Graz
- [21] Technologien für die Energiewende. Technologiebericht 6.2 Energieeffiziente Querschnittstechnologien, Hierzel, S., Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken 2017
- [22] Müller, M. Dr., Röllig, P. Dr. u. Paatzsch, R.: Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln, Dessau-Roßlau 2013
- [23] Technologien für die Energiewende. Technologiebericht 1.4 Solare Wärme und Kälte, Giovannetti, F., Kastner, O., Lampe, C., Reineke-Koch, R., Park, S. u. Steinweg, J., Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken 2017
- [24] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Photonik Forschung Deutschland, Bonn 2011
- [25] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Optische Technologien Förderinitiative „LED-Leitmarktinitiative“, 2014
- [26] Beleuchtung: Auswirkungen von Rebound-Effekten und gesellschaftlichen Trends auf den Energieverbrauch sowie Möglichkeiten der Adressierung durch politische Instrumente, Leuser, L., Weiß, U. u. Brischke, L.-V., Berlin 2016
- [27] Fraunhofer: FORSCHUNG KOMPAKT, 2015

- [28] Urbansky, A. Dipl.-Ing.: Energieeffiziente Produktion im Maschinen- und Anlagenbau, 2013
- [29] Deutsche Energie-Agentur (dena) - Motoren & Antriebssysteme: Energieeffizienz-Anforderungen an Elektromotoren. Effizienzniveaus, 2017, abgerufen am: 12.07.2017
- [30] Weyland, M., Albert, R., Halatsch, A., Icha, P., Jäger, F., Juhrich, K., Kuhnhenh, K., Mohr, L., Mordziol, C., Ollig, M., Osiek, D., Reinhardt, A.-S. u. Schuberth, J.: Stromsparen. Schlüssel für eine umweltschonende und kostengünstige Energiewende, Dessau-Roßlau 2015
- [31] Plötz, P. Dr. u. Eichhammer, W. Dr.: Zukunftsmarkt Effiziente Elektromotoren. Fallstudie im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“, Karlsruhe 2011, abgerufen am: 13.07.2017
- [32] Energieeffiziente IKT in der Praxis. Planung und Umsetzung von Green IT Maßnahmen im Bereich von Büroarbeitsplätzen und Rechenzentren, BMWi, Berlin 2014
- [33] Heinrich, C., Wittig, S., Albring, P., Richter, L., Safarik, M., Böhm, U. u. Hantsch, A.: Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie, Dessau-Roßlau 2014
- [34] Fachausschuss "Zukunft der erneuerbaren Wärme": Erneuerbare Energien im Wärmesektor – Aufgaben, Empfehlungen und Perspektiven, 2015
- [35] Petersen, H. u. Schock, M.: Energieeffiziente Warmwasserversorgung. Wann dezentrale Systeme sinnvoll sind. Lüneburg: Universität Lüneburg 2015
- [36] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: BMWi Newsletter Energiewende - Ausgabe 10/2014, 2014
- [37] Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin 2011
- [38] Klimaschutzszenario 2050. 1. Modellierungsrunde, Öko-Institut e.V. u. Fraunhofer ISI, 2014
- [39] Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global, Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum, Fraunhofer IWES u. Ingenieurbüro für neue Energien, 2012

## Anhang

Tabelle 12: Untersuchte Energieszenarien mit Zielen und Abkürzungen [14]

Referenzszenarien	THG-Minderungsziel in 2050	Abkürzung
Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Referenzszenario, Trendszenario [15]	-	ERP-Ref
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Aktuelle Maßnahmen Szenario [16]	-	KSZ-AMS
<b>Zielszenarien</b>		
Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Zielszenario [15]	80% (1)	ERP-Ziel
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 80 [16]	80%	KSZ-KS80
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 95 [16]	95%	KSZ-KS95
Klimaschutzszenarien 1. Runde, Klimaschutzszenario 90 [38]	90%	KSZ-KS90
Leitstudie 2011, Szenario A [39]	80%	LS 2011-A
Leitstudie 2011, Szenario THG95 [39]	95% (2)	LS 2011-THG95
Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 [17]	95%	THGND

(1) nur energiebedingte Emissionen

(2) Ziel wird erst 2060 erreicht

**A.5. Sektorsteckbrief Verkehr**

# **Sektorsteckbrief**

## **Verkehr**

### **Strategisches Leitprojekt**

#### **Trends und Perspektiven der Energieforschung**

Teilprojekt:

Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende

(FKZ 03ET4036 X-Z)

#### **Autorinnen und Autoren:**

John Anderson, Stefan Trommer, Tobias Kuhnimhof

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Verkehrsforschung

Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

Berlin, 26.04.2018

**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036 X-Z durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

**Kontakt:**

Dr.-Ing. John Anderson  
Institut für Verkehrsforschung  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin

**Gefördert durch:**

Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>1 Charakterisierung des Sektors</b> .....	<b>1</b>
1.1 Definition und Abgrenzung.....	1
1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung.....	2
1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen .....	3
<b>2 Herausforderungen für den Sektor</b> .....	<b>6</b>
2.1 Energie- und Klimaziele .....	6
2.2 Energie- und Emissionseinsparungen .....	8
<b>3 Relevanter Forschungsbedarf zur Zielerreichung</b> .....	<b>12</b>
3.1 Alternative Antriebe.....	12
3.2 Alternative Kraftstoffe.....	13
3.3 Infrastruktur für alternative Antriebe.....	14
3.4 Sektorkopplung .....	16
3.5 Autonomes Fahren, Digitalisierung und Vernetzung.....	17
3.6 Neue Mobilitätskonzepte.....	18
<b>4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms</b> .....	<b>20</b>
4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen.....	20
4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs.....	21
<b>5 Fazit</b> .....	<b>22</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>23</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>24</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>25</b>
<b>Literaturangaben</b> .....	<b>26</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>31</b>

# 1 Charakterisierung des Sektors

Der Sektor Verkehr ist einer von vier Energieanwendungssektoren neben Gewerbe-Handel-Dienstleistung (GHD), Industrie und private Haushalte. In diesem Kapitel wird zunächst der Sektor Verkehr definiert und von den anderen Sektoren abgegrenzt. Danach wird die energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung des Verkehrssektors betrachtet. Schließlich werden in Abschnitt 1.3 die technischen und sozioökonomischen Entwicklungen im Verkehr beschrieben.

## 1.1 Definition und Abgrenzung

Das *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften* beschreibt Verkehr als die Ortsveränderung von Personen, Gütern und Nachrichten in einem definierten System. Personenverkehr bezeichnet die Ortsveränderung von Personen und Gütertransport die Ortsveränderung von materiellen Gütern. Nachrichtenverkehr ist der „Produktionsprozess des Nachrichtenwesens, in dem Information mittels spezieller betrieblicher, technologischer und technischer Prozesse durch Nachrichtenverkehrsanlagen ortsverändert wird“ [1]. Öffentlicher Personenverkehr untergliedert sich in den öffentlichen Personennahverkehr und den öffentlichen Personenfernverkehr [1]. Motorisierter Individualverkehr wird „mit einem eigenen Kraftfahrzeug selbst geplant und durchgeführt“ [1].

Der Verkehr spielt eine zentrale und wichtige Rolle für die Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland. Mobilität und Verkehr bewegen die Menschen heute mehr denn je: Sie garantieren gesellschaftliche Teilhabe, wirtschaftliche Aktivitäten, Fortbewegung im Alltag vor Ort und auch den Anschluss an die Welt. Der Verkehrssektor umfasst unter anderem Straßen-, Schienen-, Luft- und Wasserverkehr. Ein besonderes Merkmal für den Sektor Verkehr ist der lange Zeithorizont für die Umsetzung von Maßnahmen, welcher nicht außer Acht gelassen werden darf.

In diesem Steckbrief wird zwischen Energieanwendung und Energieerzeugung unterschieden. Der Sektorsteckbrief Verkehr befasst sich nur mit der Energieanwendung, z. B. dem Forschungsbedarf rund um den Einsatz biogener Kraftstoffe bei Verkehrsanwendungen. Dabei wird unter anderem thematisiert welche Kraftstoffe für welche Antriebsart benötigt werden. Die Energieerzeugung und Energiebereitstellung wird im Sektorsteckbrief Energiewandlung behandelt, z. B. der Forschungsbedarf rund um die Bereitstellung und Erzeugung biogener Kraftstoffe in großen Raffinerien.

## 1.2 Energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung

Globale Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) werden von der *United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* zusammengefasst. Laut dem neusten *IPCC Fifth Assessment Report (2014)* war der Verkehrssektor für 23 % der globalen gesamten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen (6,7 Gt CO<sub>2</sub> 2010) verantwortlich [2]. Der nächste *IPCC* Bericht ist in Bearbeitung und wird 2022 veröffentlicht. Für Deutschland existieren bereits aktuellere Daten: Im Jahr 1990 wurden insgesamt 163 Mt CO<sub>2</sub>-Äq im Verkehrssektor in Deutschland ausgestoßen. Dieser Wert verringerte sich leicht auf 160 Mt CO<sub>2</sub>-Äq im Jahr 2014 [3]. Im Jahr 2015 entstanden über 95 % der Verkehrsemissionen in Deutschland (ohne ausländischen Flug- und Schiffsverkehr) im Straßenverkehr [4]. Das Ziel für den Verkehrssektor ist eine Reduzierung der THG-Emissionen um 40 bis 42 % bis zum Jahr 2030 gegenüber 1990 [3]. Die THG-Emissionen für den Verkehrssektor und das Minderungsziel für 2030 sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: THG-Emissionen in Deutschland je nach Zieldefinition einbezogenen Handlungsfelder [3].

<b>Sektor</b>	<b>1990</b> [in Mt CO <sub>2</sub> -Äq.]	<b>2014</b> [in Mt CO <sub>2</sub> -Äq.]	<b>2030</b> [in Mt CO <sub>2</sub> -Äq.]	<b>2030</b> [Minderung in % gegenüber 1990]
Energiewirtschaft	466	358	175–183	61–62 %
Gebäude	209	119	70–72	66–67 %
<b>Verkehr</b>	<b>163</b>	<b>160</b>	<b>95–98</b>	<b>40–42 %</b>
Industrie	283	181	140–143	49–51 %
Landwirtschaft	88	72	58–61	31–34 %
<b>Teilsomme</b>	<b>1.209</b>	<b>890</b>	<b>538–557</b>	<b>54–56 %</b>
Sonstige	39	12	5	87 %
<b>Gesamtsumme</b>	<b>1.248</b>	<b>902</b>	<b>543–562</b>	<b>55 – 56 %</b>

Der gesamte Endenergieverbrauch (EEV) 2016 für die Bundesrepublik Deutschland betrug 9.152 PJ [5]. Der Anteil am gesamten deutschen Endenergieverbrauch im Verkehrssektor war 29 % (2.699 PJ) im Vergleich zu 28 % für Industrie (2.581 PJ), 26 % für Haushalte (2.394 PJ) und 16 % für GHD (1.480 PJ) [5]. Die indirekten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Sektoren sind in Abbildung 1 dargestellt. Demzufolge ist der Sektor Verkehr von besonderer Bedeutung für die Energie- und Klimaziele.

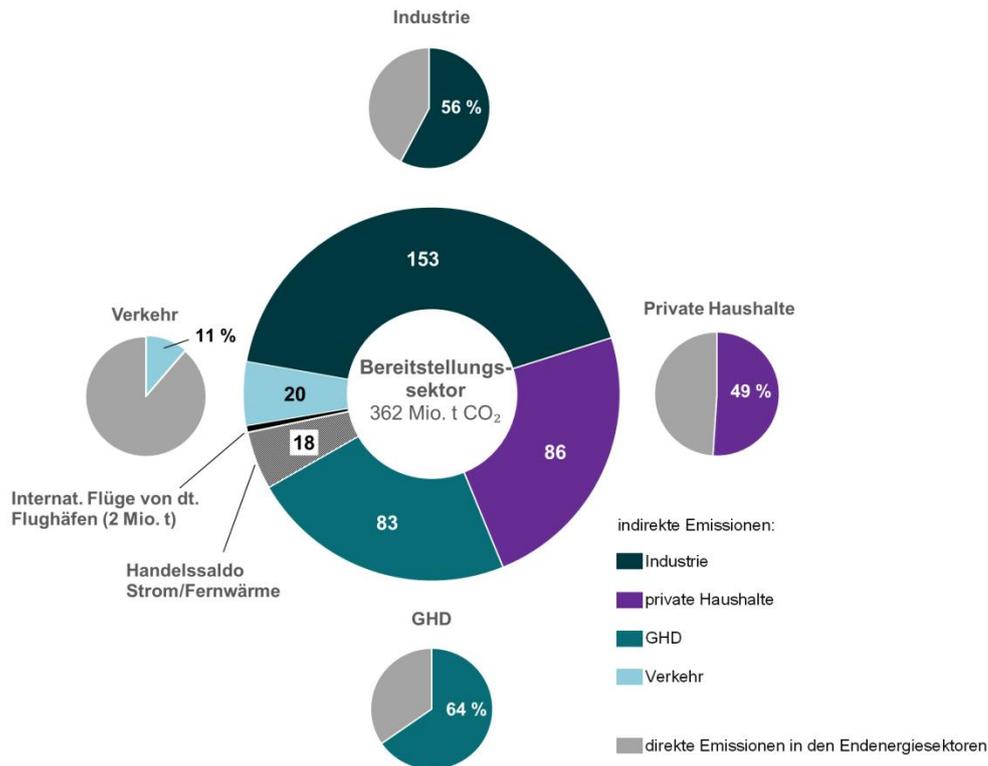


Abbildung 1: Aufteilung der indirekten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energiewirtschaft durch Strombezug und Anteil der direkten und indirekten Emissionen in den Endenergiesektoren 2014 [6].

### 1.3 Technische und sozioökonomische Entwicklungen

Die Verkehrsleistung im Personenverkehr betrug 2016 insgesamt 1.207,8 Mrd. Personenkilometer. Davon entfielen 80 % auf den motorisierten Individualverkehr (965,5 Mrd. Personenkilometer) und 20 % auf den öffentlichen Verkehr (242,3 Mrd. Personenkilometer). Im öffentlichen Verkehr wurden 40 % von Eisenbahnen (95,8 Mrd. Personenkilometer), 34 % im öffentlichen Straßenpersonenverkehr (82,5 Mrd. Personenkilometer) und 26 % im Luftverkehr (63,9 Mrd. Personenkilometer) zurückgelegt. [7] Der motorisierte Personenverkehr wird bezogen auf die zurückgelegten Personenkilometer zwischen 2010 und 2030 um 13 % wachsen [8]. Es wird erwartet, dass die Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr in diesem Zeitraum um 10 %, im Eisenbahnverkehr um 19 % und im Luftverkehr um 65 % steigen [8].

Die Verkehrsleistung im binnenländischen Güterverkehr betrug 2016 insgesamt 654,8 Mrd. Tonnenkilometer (tkm). Die Quellen für diese Verkehrsleistungen waren 18 % Eisenbahnen (116,2 Mrd. tkm), 8 % Binnenschifffahrt (54,3 Mrd. tkm), 71 %

Straßengüterverkehr (464,0 Mrd. tkm), 3 % Rohrfernleitung (18,8 Mrd. tkm) und 0,2 % Luftverkehr (1,5 Mrd. tkm). [7] Der Güterverkehr wird voraussichtlich zwischen 2010 und 2030 bezogen auf die zurückgelegten Tonnenkilometer um 38 % wachsen. Dieses Wachstum resultiert aus einem Zuwachs der Transportleistung nach folgenden Verkehrsträgern: Binnenschiff 23 %, Straße (Lastkraftwagen (Lkw)) 39 % und Schiene 43 %. [8]

Eine weitere Entwicklung ist der steigende Motorisierungsgrad in Deutschland.

Im Jahr 2012 gab es 493 Personenkraftwagen (Pkw) je 1.000 Einwohner. Der Motorisierungsgrad wird auf den Spitzenwert von 521 Pkw je 1.000 Einwohner im Jahr 2025 ansteigen. Anschließend verringert sich der Wert wiederum auf 510 Pkw je 1.000 Einwohner im Jahr 2040. [9]

Es gibt derzeit zahlreiche technische und systemische Trends im Sektor Verkehr. Zwei neue wichtige Entwicklungen sind das autonome Fahren sowie die Digitalisierung und Vernetzung der Verkehrsträger. Autonomes Fahren ermöglicht selbstständiges Fahren der Fahrzeuge ohne menschliche Steuerung. Aktuell wird eine Evolution über verschiedene Automatisierungsstufen (Hoch- und Vollautomation) hin zum autonom fahrenden Fahrzeug erwartet. Dabei werden autonome Fahrzeuge für den Personen- und Güterverkehr sowohl im öffentlichen als auch im nichtöffentlichen Verkehr eingesetzt. Die Digitalisierung und Vernetzung im Sektor Verkehr beinhaltet die Verknüpfung von Fahrzeugen und Infrastruktur mittels Informations- und Kommunikationssystemen.

Zusätzliche bedeutende technische Trends im Sektor Verkehr sind die Entwicklung von alternativen Antriebstechniken und alternativen Kraftstoffen. Alternative Antriebstechniken sind Elektroantriebe (z.B. Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge) und Hybridantriebe (d. h. Mischformen aus konventionellen und elektrischen Antriebskomponenten). Zu den alternativen Kraftstoffen zählen unter anderem Wasserstoff, Biodiesel, Ethanol, Erdgas (CNG) und Flüssiggas. Durch die Nutzung von Strom im Verkehr entstehen sektorübergreifende Effekte. Vor allem die Sektorkopplung zwischen den Sektoren Verkehr und Energiewirtschaft ist ein wichtiger systemischer Trend.

Weitere Entwicklungen im Sektor Verkehr sind neue Mobilitätsangebote und deren Auswirkungen auf das Verkehrssystem. Diese neuen Angebote sind u.a. Carsharing, Ridesharing und Mobility-as-a-Service. Carsharing bedeutet die Teilung eines Fahrzeuges, Ridesharing hingegen die Teilung einer Autofahrt. Mobility-as-a-Service

beschreibt die Entwicklung weg vom Besitz eines Fahrzeuges hin zu einem System von Mobilitätslösungen angeboten durch verschiedene Dienstleistungen.

Insbesondere die Elektromobilität und das autonome Fahren werden künftig eine wichtige Rolle im Verkehrssektor spielen. Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge (E-Fahrzeuge) auf die deutschen Straßen zu bringen [10]. Im Juli 2017 gab es allerdings nur 87.600 E-Fahrzeuge (47.100 Battery Electric Vehicles (BEVs) und 40.500 Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)) in Deutschland [11, 12]. Zudem besteht die Notwendigkeit des Aufbaus einer flächendeckenden Infrastruktur (z.B. Ladepunkte für Elektrofahrzeuge) [13]. Autonome Fahrzeuge werden viele Bereiche des Verkehrs beeinflussen, wie zum Beispiel Robo-Taxis (autonom fahrende Taxis). Darüber hinaus werden autonomes Fahren und Elektromobilität mit den neuen Mobilitätskonzepten kombiniert um weitere Lösungen für den Verkehr anbieten zu können.

## 2 Herausforderungen für den Sektor

Die energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung und die in Kapitel 1 geschilderten neuen Entwicklungen im Verkehr bringen neue Herausforderungen für den Verkehrssektor mit sich. In diesem Kapitel werden diese Herausforderungen dargestellt und diskutiert. Zunächst werden die Energie- und Klimaziele für den deutschen Verkehrssektor beschrieben. Diese Ziele sind vielfältig und umfassen sowohl den Endenergieverbrauch als auch die THG-Emissionen. Im nächsten Schritt wird die Entwicklung der verkehrsspezifischen THG-Emissionen in Deutschland zusammengefasst. Schließlich werden die notwendigen Energie- und Emissionseinsparungen illustriert und kommentiert.

### 2.1 Energie- und Klimaziele

Alle relevanten Energie- und Klimaziele für den Verkehrssektor in Deutschland sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Sie stammen entweder von der Bundesregierung oder der Europäischen Kommission. Die Ziele beziehen sich auf den Endenergieverbrauch, den Anteil erneuerbarer Energieträger, die THG-Emissionen, die Emissionen für die Neuwagenflotte und auf den Anteil an Elektrofahrzeugen in der Flotte. THG-Emissionen für den gesamten Prozess (d. h. Gewinnung, Transport, Vertrieb, Verarbeitung und Verbrennung) werden anhand von Lebenszyklustreibhausgasemissionen berücksichtigt.

Tabelle 2: Zusammenfassung von Energie- und Klimazielen für den Sektor Verkehr in Deutschland.

Schwerpunkt	Jahr	Ziel	Quelle
EEV	2020	-10 % gegenüber 2005	[10]
	2050	-40 % gegenüber 2005	[10]
Erneuerbare Energieträger	2020	Min. 10 % erneuerbare Energieträger bei allen Verkehrsträgern bezogen auf den Endenergieverbrauch im Verkehrssektor	[14]
THG- Emissionen	2020	-6 % Lebenszyklustreibhausgasemission von Kraftstoffen/Energieträgern gegenüber 2010	[15]
	2030	-20 % gegenüber 2008	[16]
	2030	-40 bis 42 % gegenüber 1990	[3]
	2050	-60 % gegenüber 1990	[16]
	2050	-54 bis 67 % gegenüber 1990	[17]

	2050	weitestgehend treibhausgasneutraler Verkehr	[3]
Flotten Emissionen	2020	durchschnittlich 95 g CO <sub>2</sub> /km für die Pkw-Neuwagenflotte der Fahrzeughersteller	[18]
	2020	durchschnittlich 147 g CO <sub>2</sub> /km für die Neuwagenflotte leichter Nutzfahrzeuge der Fahrzeughersteller	[19]
E-Fahrzeuge	2020	1 Million E-Fahrzeuge in Deutschland	[10]
	2030	6 Million E-Fahrzeuge in Deutschland	[10]

Die Entwicklung der THG-Emissionen im Sektor Verkehr der Jahre 1990 bis 2015 ist in Abbildung 2 dargestellt. Abbildung 3 ermöglicht einen Vergleich dieser verkehrsspezifischen THG-Emissionen mit verschiedenen Zielsetzungen der EU und der Bundesregierung (Tabelle 2). Aus der Entwicklung der THG-Emissionen (Abbildung 2) und den unterschiedlichen Klimazielen (Abbildung 3) können drei wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Erstens werden die verkehrsspezifischen THG-Emissionen in Deutschland vom Straßenverkehr dominiert (Anteil von 96 % in 2015) [4]. Sonstiger inländischer Verkehr wie Güter-, Schienen-, Flug-, und Schiffsverkehr spielt nur eine minimale Rolle. Deshalb sollte der Schwerpunkt der Senkung von THG-Emissionen auf dem Straßenverkehr liegen. Zweitens gab es keine beträchtliche Reduzierung der verkehrsspezifischen THG-Emissionen in Deutschland in den letzten 15 Jahren. Demzufolge ist diesbezügliche Forschung im Verkehrssektor und besonders im Straßenverkehr äußerst wichtig. Drittens sind die unterschiedlichen Klimaziele weit entfernt vom heutigen Stand der THG-Emissionen im Verkehrssektor. Demnach müssen erhebliche Umsetzungsfortschritte gemacht werden, um die Ziele erreichen zu können.

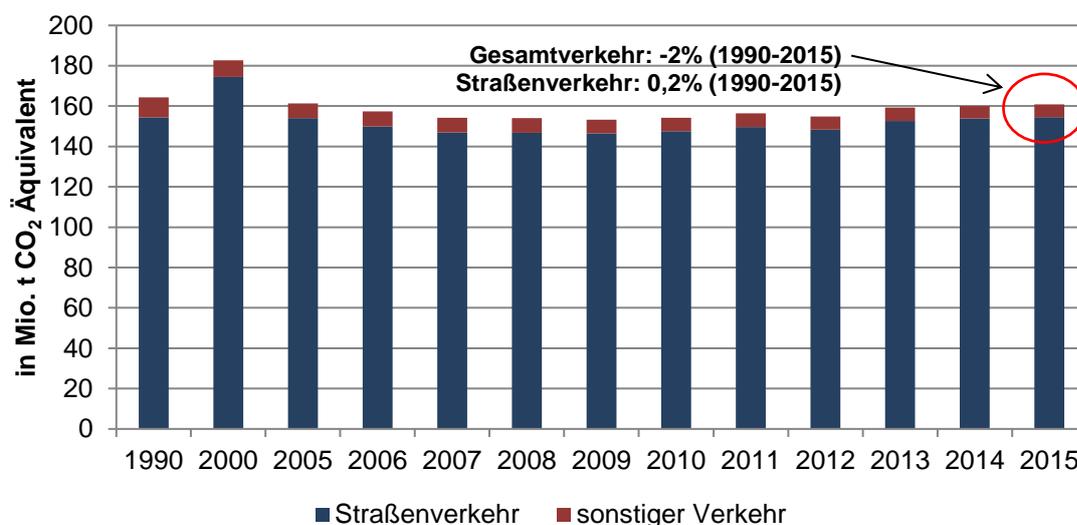


Abbildung 2: Entwicklung der verkehrsspezifischen THG-Emissionen in Deutschland (ohne Luft- und Schiffsverkehr) [4].

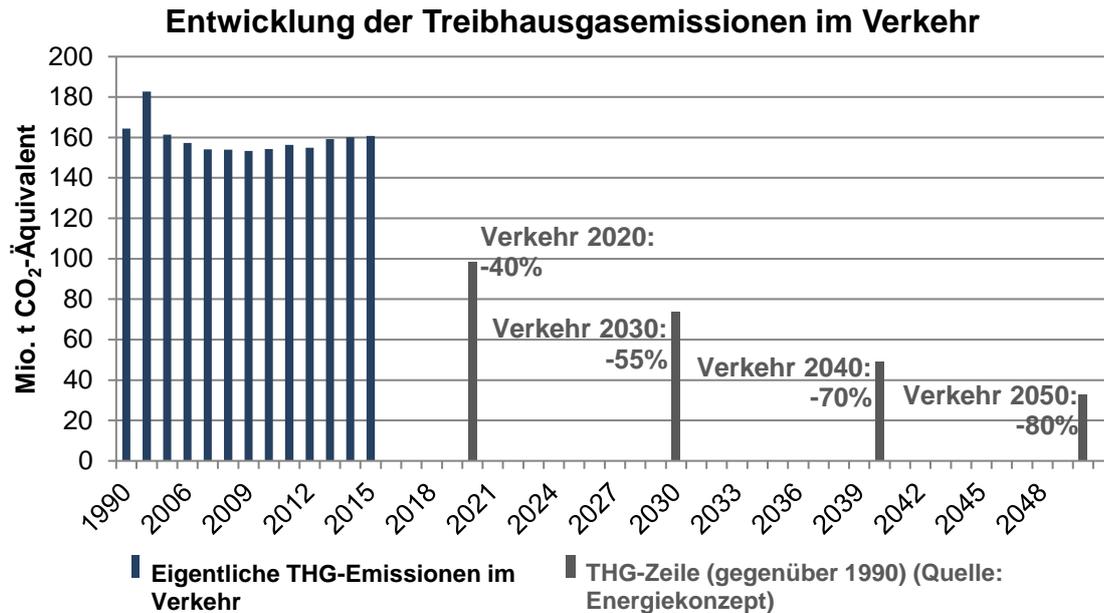


Abbildung 3: Entwicklung der THG-Emissionen im Verkehr in Deutschland im Vergleich mit unterschiedlichen Klimazielen (Quellen: THG-Emissionen im Verkehr [4], Energiekonzept [10]).

## 2.2 Energie- und Emissionseinsparungen

In diesem Kapitel werden verschiedene Szenarien für den Klimaschutz in Deutschland vorgestellt. Diese Szenarien zielen auf eine Minderung der THG-Emissionen um 80 bzw. 95 % bis 2050 ab (Tabelle 9 im Anhang).

### 2.2.1 Endenergie

Der sektorale einzusparende Endenergiebedarf zur Erreichung der Emissionsminderungsziele -80 und -95 % in 2050 ist für jeden Sektor in Abbildung 4 dargestellt. Über alle Szenarien hinweg ist eine Reduktion des Verbrauchs fossiler Endenergieträger zu beobachten. Für das Szenario mit -80 % THG-Emissionen (KSZ-KS80) ist eine Endenergieverbrauchsreduktion im Verkehrssektor von -1250 PJ/a (-55,2 %) gegenüber 2010 notwendig. Für das Szenario mit -95 % THG-Emissionen (KSZ-KS95) ist eine Reduktion im Verkehrssektor von -1457 PJ/a (-64,3 %) gegenüber 2010 nötig. Der genaue Endenergiebedarf für den Sektor Verkehr in 2030 und in 2050 je nach Szenario ist in Abbildung 5 dargestellt und in Tabelle 10 (Anhang) aufgelistet.

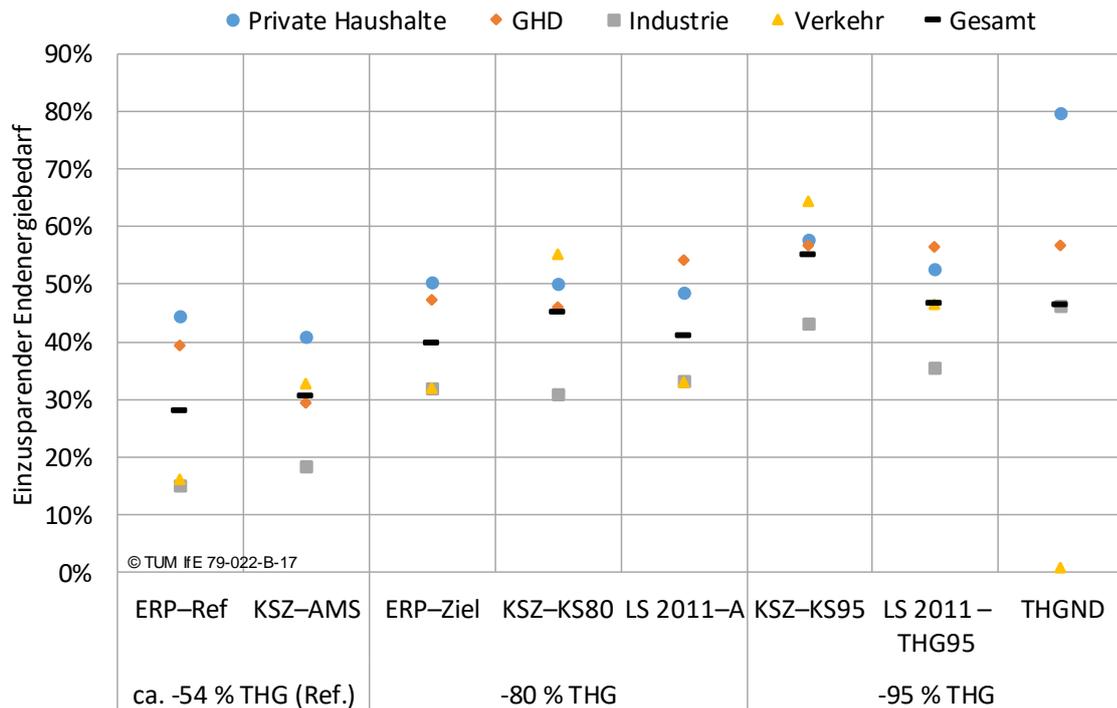


Abbildung 4: Sektorale Aufteilung des einzusparenden Endenergiebedarfs. Die EEV im Verkehr für das THGND Szenario bleibt fast unverändert, da hier der internationale Flug- und Seeverkehr mitbilanziert wurde [20].

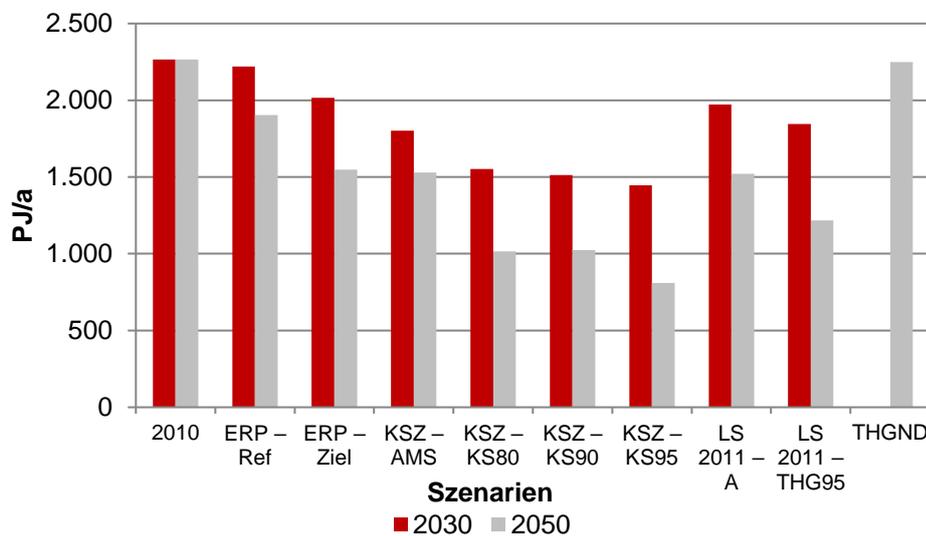


Abbildung 5: Endenergiebedarf im Verkehrssektor 2010 und 2030 abhängig vom Szenario (Werte in Tabelle 10 im Anhang) [20].

Um die Ziele der Szenarien erreichen zu können, wurden verschiedene Annahmen getroffen und Strategien für den Verkehrssektor analysiert. Die Annahmen konzentrieren

sich überwiegend auf eine zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen und insbesondere auf die Steigerung der elektrischen Fahrleistung durch vollelektrische Fahrzeuge und Plug-in-Hybride Fahrzeuge [21]. Hierbei soll bis zum Jahr 2050 der Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge an der gesamten Fahrleistung im Verkehrssektor auf mindestens 50 % gesteigert werden [21]. Darüber hinaus wird die Verwendung von Biokraftstoffen und Wasserstoff in Kraftfahrzeugen unterstellt [21]. Die Szenarien unterscheiden sich hauptsächlich durch die Annahmen zur strombasierten Erzeugung von Wasserstoff und Methan [21]. Hierbei könnte ein Teil des durch Elektrolyse erzeugten Wasserstoffs mit Kohlenstoffdioxid in Methan und Wasser umgewandelt werden (Sabatier-Prozess). Darüber hinaus kann Methan in das Erdgasnetz eingespeist und in Fahrzeugen mit Gasmotoren eingesetzt werden [21].

### 2.2.2 THG-Emissionen

Abbildung 6 zeigt die einzusparenden THG-Emissionen für jeden Sektor und das Gesamtsystem für die -80 % und -95 % Szenarien. Für das -80 % THG-Emissionen-Szenario wird eine Reduktion im Verkehrssektor von -133 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq./a (-80,6 %) benötigt. Im Vergleich ist bei dem -95 % THG-Emissionen-Szenario eine Reduktion um -162 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq./a (-98,2 %) notwendig. Daraus lässt sich ableiten, dass jede Anwendungsart auf möglichst THG-neutrale Technologien umgestellt werden muss.

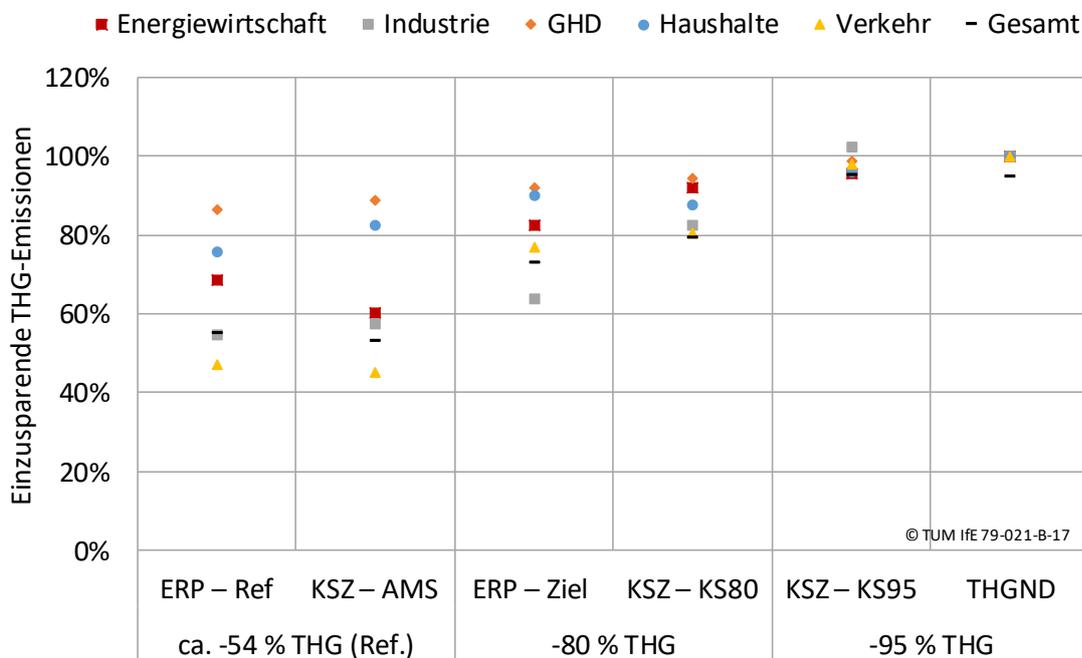


Abbildung 6: Sektorale Aufteilung der einzusparenden THG-Emissionen in 2050 [20]. Der Wert von über 100 % bei Industrie im „KSZ-KS95“-Szenario liegt an den negativen Emissionen der Biomassenutzung als Carbon Capture and Storage bei Biogasanlagen [20].

Die THG-Emissionen für den Sektor Verkehr in 2030 und in 2050 sind in Abbildung 7 dargestellt und in Tabelle 11 (Anhang) aufgelistet.

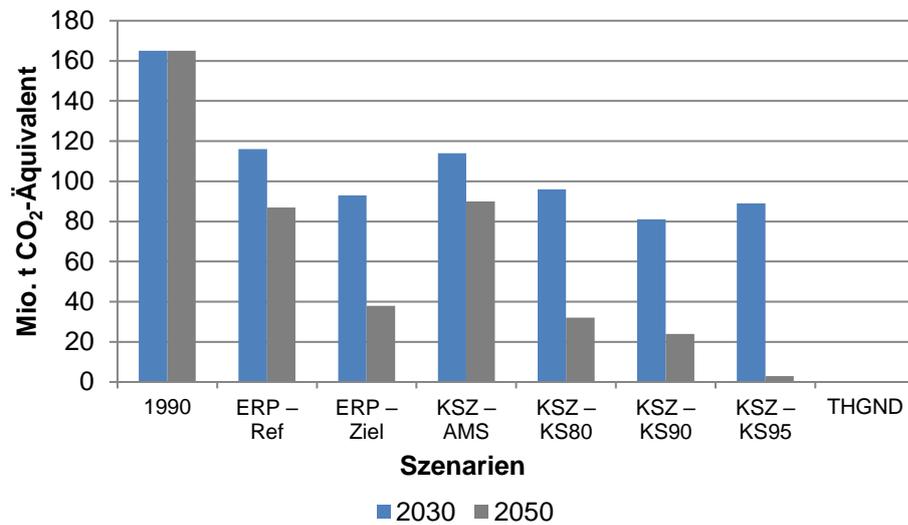


Abbildung 7: THG-Emissionen im Verkehrssektor 2030 und 2050 abhängig vom Szenario (Werte in Tabelle 11 im Anhang) [20].

### 3 Relevanter Forschungsbedarf zur Zielerreichung

Dieses Kapitel identifiziert den relevanten Forschungsbedarf zur Erreichung der Energie- und Klimaziele des Verkehrssektors. Die Energie- und Klimaziele für den Sektor Verkehr (Tabelle 2) und die Entwicklungen der THG-Emissionen im Verkehr in Deutschland (Abbildung 2) bilden die Grundlage für den ermittelten Forschungsbedarf. Es resultieren sechs Maßnahmen für den Verkehrssektor: *alternative Antriebe*, *alternative Kraftstoffe*, *Infrastruktur für alternative Antriebe*, *Sektorkopplung*, *Autonomes Fahren*, *Digitalisierung und Vernetzung* und *neue Mobilitätskonzepte*. Die Gliederung des Kapitels erfolgt nach dem Einfluss des Forschungsbedarfs auf die THG-Emissionen des Sektors.

#### 3.1 Alternative Antriebe

Alternative Antriebe, oder alternative Antriebstechniken, sind Fahrzeugantriebe, die sich von den Standardantriebsarten unterscheiden. Dazu zählen E-Fahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeugen und Antriebe mit alternativen Kraftstoffen (z.B. Biodiesel, Erdgas). Da die verkehrsspezifischen THG-Emissionen in Deutschland vom Straßenverkehr dominiert werden (über 90 %), spielen alternative Antriebe für den Straßenverkehr eine zentrale Rolle bei der Erreichung der Energie- und Klimaziele [4]. Darüber hinaus blieb dieser Wert in den letzten 15 Jahren nahezu unverändert: 1990 resultierten ca. 94 % und 2015 ca. 96 % der Emissionen des Verkehrssektors aus dem Straßenverkehr. Demzufolge gibt es umfangreichen Forschungsbedarf zu alternativen Antrieben, die in Tabelle 3 aufgelistet sind.

Tabelle 3: Forschungsbedarf zu alternativen Antrieben.

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Maximierung des elektrischen Fahranteils bei Plug-in Hybrid Fahrzeugen um Energiebedarf und THG-Emissionen zu minimieren [21-23].	X	X			
Entwicklung von neuen Speichertechnologien für E-Fahrzeuge zur Erreichung erhöhter Reichweiten und ihre Auswirkungen auf das Nutzer- und Ladeverhalten [13, 24, 25].	X	X		X	
Weiterentwicklungen von Batterien für E-Fahrzeuge sowie die Entwicklung von Recyclingtechnologien für Brennstoffzellen und E-Fahrzeug-Batterien und Second-Life-Anwendungen von Fahrzeugbatterien [26, 27].	X	X			
Verbesserung des Wirkungsgrades von Brennstoffzellen besonders für Lkw, um die Kraftstoffkosten zu senken. Die Effizienzsteigerung für Lkw im Fernverkehr ist entscheidend wegen der hohen Fahrleistungen und deren Auswirkungen auf die Total Cost of Ownership [28].		X	X		
Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben und die Analyse der CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten der jeweiligen Antriebstechnologie aus statischer und dynamischer Sicht [26, 29].		X	X		

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.2 Alternative Kraftstoffe

Die oben genannten Szenarien für Energie- und Klimaziele (Kapitel 2) konzentrieren sich sehr stark auf E-Fahrzeuge. Nichtsdestotrotz tragen alternative Kraftstoffe entscheidend für die Erreichung dieser Ziele bei [21]. Zu alternativen Kraftstoffen zählen unter anderem Biokraftstoffe (z.B. Biodiesel, Bioethanol, Biomethan, Biomass-to-Liquid), Elektrokraftstoffe (z.B. Power-to-Gas (PtG), Power-to-Liquid (PtL)), Erdgas und Wasserstoff [30].

Wie im Abschnitt 3.1 (Alternative Antriebe) spielt der Straßenverkehr eine entscheidende Rolle bei der erfolgreichen Umsetzung auf alternative Kraftstoffe. Ebenso sind alternative Kraftstoffe (z.B. PtL) besonders für den Luftverkehr aufgrund des Zuwachs der Transport- und Verkehrsleistungen im Luftverkehr entscheidend [8, 31].

Darüber hinaus sind alternative Kraftstoffe zentral für die Reduzierung der THG-Emissionen im Güter-, Schienen- und Schiffsverkehr [22, 23]. Der Forschungsbedarf zu den alternativen Kraftstoffen ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Forschungsbedarf zu den alternativen Kraftstoffen.

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten von alternativen Kraftstoffen in Bereichen außerhalb des straßengebundenen Verkehrs wie Luft-, Schiff- oder Schienenverkehr [22, 23, 32].		X		X	
Weiterentwicklung von elektrischen Antrieben in der Luftfahrt, um eine hohe Effizienz bei Volumen- und Gewichtsbeschränkungen zu bewältigen, Zyklusstabilität der Batterien zu steigern und eine hohe Spannungsqualität und Zuverlässigkeit der Stromrichter zu sichern [33].		X			
Reduzierungen der Gesamtkosten für PtL Kraftstoffproduktion, besonders für den Luftverkehr, da die Gesamtkosten für PtL Kraftstoffe von den Kapitalkosten und den Energieumwandlungsverluste durch den aufwendigen Herstellungsprozess stark beeinflusst sind [31].		X	X		
Analyse der Verwendung von Biokraftstoffen und Wasserstoff für den Personen- und Güterverkehr mit dem Forschungsschwerpunkt auf Nutzerakzeptanz [9, 26].		X		X	
Analyse möglicher Nutzungskonkurrenz von Biomasse im Verkehrssektor mit anderen Sektoren (z.B. Stromsektor, Wärmebereitstellung, Nahrungsmittelversorgung) [21].		X		X	X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.3 Infrastruktur für alternative Antriebe

Die Erreichung der Energie- und Klimaziele im Verkehrssektor erfordert eine ausreichende Infrastruktur für alternative Antriebe, besonders im Straßenverkehr. Studien haben belegt, dass der Mangel an Infrastruktur für alternative Antriebe den Erfolg dieser Fahrzeuge verhindert [34, 35]. Daher wird Infrastruktur für Elektrofahrzeuge (u. a. Ladestationen und auch induktive Ladeinfrastruktur) und ebenso für alternative flüssige und gasförmige Kraftstoffe benötigt. Die Bedeutung zeigt der *Nationale Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe*

[36] auf. Der Bericht beinhaltet Maßnahmen im Bereich Strom, Erdgas, Wasserstoff und Ladeinfrastruktur sowie Liquefied Natural Gas Tankstellen besonders in See- und Binnenhäfen [36]. Hieraus ergeben sich bestimmte Herausforderungen für jede Technologie, wie zum Beispiel die Tankstelleninfrastruktur für Lkw [37, 38]. Darüber hinaus sind auch die Finanzierungs- und Zahlssysteme entscheidend für den Erfolg der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe [39-41]. Diesbezüglich liegt der Fokus auf einheitlichen Lade- und Bezahlstandards [39]. Der Forschungsbedarf zur Infrastruktur für alternative Antriebe ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Forschungsbedarf zur Infrastruktur für alternative Antriebe.

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Entwicklung von Konzepten für die Koppelung der erneuerbaren Energien mit der Wasserstoffinfrastruktur, Strategien zur Nutzung der On-site und Off-site Wasserstofferzeugung und Lösungen für dezentrale Wasserstofftankstellen auf Betriebsgeländen besonders für Lkw [37, 38].	X	X	X		X
Entwicklung von Ladeinfrastrukturstrategien für E-Fahrzeuge im Güterverkehr, die keine Ladeinfrastruktur auf dem privaten Betriebsgelände haben und ungeeignet sind öffentliche Ladeinfrastruktur zu nutzen [13].				X	X
Weiterentwicklung des induktiven und induktiven bidirektionalen Ladens von E-Fahrzeugen um Kosten zu reduzieren, die Effizienz zu steigern und die Sensitivität der Positionierung des E-Fahrzeugs zu minimieren [42, 43].		X	X		X
Erstellung von einheitlichen Lade- und Bezahlstandards sowie Zugangs- und Abrechnungssystemen für die Elektromobilitätsinfrastruktur und Identifizierung von dienstleistungsorientierten Geschäftsmodellen, um die Attraktivität der Elektromobilität zu steigern und einen Massenmarkt entwickeln zu können [39-41].			X	X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.4 Sektorkopplung

Sektorkopplung beschreibt die Vernetzung der Energiewirtschaft, der Industrie und des Verkehrs, um Synergieeffekte zu ermöglichen und einen hohen Anteil erneuerbarer Energien in den Sektoren zu integrieren. Obwohl E-Fahrzeuge zur Reduktion von THG-Emissionen im Verkehrssektor beitragen können, hängt dies maßgeblich vom Strommix und des Ladezeitpunktes ab [44, 45]. Demzufolge ist Sektorkopplung entscheidend für die Erreichung der Energie- und Klimaziele und die Umsetzung der Energiewende. Im Besonderen müssen die Wechselwirkungen zwischen Verkehrssektor und Energiesektor ganzheitlich betrachtet werden [46-48].

Hierbei werden gesteuertes Laden, Vehicle-to-Grid Technologien und Nutzerverhalten eine wichtige Rolle spielen. Gesteuertes Laden beschreibt das Laden von Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien im Stromnetz. Vehicle-to-Grid Technologien ermöglichen die Speicherung und Abgabe von Strom von E-Fahrzeugen in das Stromnetz. Zusätzlich spielt Sektorkopplung eine wichtige Rolle bei der Herstellung von Kraftstoffen mittels Strom aus erneuerbaren Energien (d. h. PtG, PtL) [49, 50]. Der Forschungsbedarf für Sektorkopplung ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Forschungsbedarf zur Sektorkopplung.

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Optimierung von Ladestrategien für einen Massenmarkt von Elektrofahrzeugen mit Vehicle-to-Grid Technologien (inkl. Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien, Elektrofahrzeuge als Stromspeicher, gesteuertes Laden und Peak Shaving) [23, 51, 52].		X	X	X	X
Entwicklung von Ausbaustrategien für das Stromnetz (zentral und dezentral) mit erneuerbaren Energien (z.B. Wasserkraft, Windenergie, Solarenergie, Bioenergie) für einen Massenmarkt von Elektrofahrzeugen [23, 53].	X	X			X
Analyse der Nutzung von dezentralen PtG-Anlagen im Hinblick auf den Stromsektor und die Kraftstoffbereitstellung um Synergiepotentiale von Energie und Verkehr zu erreichen [50].		X	X		X

Untersuchung der indirekten volkswirtschaftlichen Effekte der Nutzung von PtG für den Verkehrssektor (z. B. Kostenreduktionen durch die Flexibilisierung der Stromnachfrage, vermiedene Kosten für konventionelle Spitzenlastkraftwerke durch die der Optimierung des Energiesystems) [50].			X	X	X
Untersuchung der Auswirkungen vom Ladebedarf im Hinblick auf die Schnellladeinfrastruktur und deren zeitliche und örtliche Verteilung [13, 52].		X			X

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.5 Autonomes Fahren, Digitalisierung und Vernetzung

Neben der zunehmenden Verbreitung alternativer Antriebe sowie alternativer Kraftstoffe im Verkehrssektor, entstehen derzeit viele neue technische Entwicklungen. Die drei großen Bereiche sind autonomes Fahren, Digitalisierung und Vernetzung. Die Vermutung liegt nahe, dass diese einen erheblichen Einfluss auf den verkehrsspezifischen Endenergieverbrauch und somit auf die verursachten Treibhausgas-Emissionen haben werden [54, 55]. Da derzeit noch unklar ist, ob sich die Größe der Gesamtfahrzeugflotte und deren Gesamtfahrleistung signifikant durch diese Entwicklungen verändern werden, besteht in diesem Bereich großer Forschungsbedarf.

Im Personenverkehr wird gemäß [54] und [55] das autonome Fahren, die Digitalisierung und die Vernetzung nicht nur auf die Fahrleistung großen Einfluss haben, sondern auch auf die Verkehrsmittelnutzung (Modal Split).

Auch im Güterverkehr sind große Änderungen zu erwarten: zum Beispiel erlaubt das sog. Platooning [56], dass teilweise auch als ‚digitale Deichsel‘ bezeichnet wird, aufgrund der Car-2-Car-Kommunikation das sichere Fahren mehrerer Lkw im Verbund mit minimalem Abstand. Die Verringerung des Windwiderstands reduziert den Kraftstoffverbrauch auf Langstrecken deutlich.

Neben den technischen Aspekten wird die Akzeptanz der Gesellschaft sowie des Individuums gegenüber dieser neuen Technologie den Erfolg und die Nutzung von autonomen Fahrzeugen bestimmen [54]. Der Forschungsbedarf für autonomes Fahren, Digitalisierung und Vernetzung ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Forschungsbedarf zum Autonomen Fahren, Digitalisierung und Vernetzung.

Forschungsbedarf	KUR	T	W	GPR	V
Analyse der übergeordneten Auswirkungen des autonomen Fahrens auf die Verkehrsnachfrage vor allem im Alltagsverkehr (inkl. Leerfahrten, Fahrleistung, Modal Split) und die daraus resultierenden THG-Emissionsveränderungen [23, 57].	X		X	X	
Analyse der Einflüsse von autonomen und vernetzten Fahren auf Kurier, Express und Paketdienste (KEP-Dienste) besonders in innerstädtischen Räumen und ihre Auswirkungen auf die Steigerung der Verkehrseffizienz [23, 58].			X	X	
Untersuchung der Verlagerungseffekte von öffentlichen Verkehrsmitteln hin zum motorisierten Individualverkehr durch autonomes und vernetztes Fahren und dessen Einfluss auf mobilitätsbedingte Emissionen [57].				X	
Auswirkungen der massenhaften Verbreitung von Vehicle-to-Vehicle und Vehicle-to-Infrastructure Kommunikation auf Endenergieverbrauch und THG-Emissionen besonders im Güterverkehr (z.B. Lkw-Platooning und ihr Kraftstoffeinsparungspotential) [56].	X	X			X
Untersuchung der Nutzerakzeptanz von automatisierten und vernetzten Fahrzeugen und Identifizierung der gesellschaftlichen Herausforderungen und Risiken, um die Auswirkungen auf den Energiebedarf und die THG-Emissionen festzustellen [59-61] [54].	X		X	X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte  
**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

### 3.6 Neue Mobilitätskonzepte

Nachfolgend werden neue Mobilitätskonzepte innerhalb des Verkehrssektors betrachtet. Hierbei sind die Auswirkungen von neuen Mobilitätskonzepten wie Carsharing, Ridesharing, Mobility-as-a-Service und Robo-Taxis auf Endenergiebedarf und THG-Emissionen zu erforschen. Dabei sollte eine kombinierte Betrachtung dieser neuen Konzepte und auch im Zusammenspiel mit der Elektromobilität und dem autonomen und vernetzten Fahren stattfinden [54].

Beispielweise könnten autonom elektrisch gefahrene Carsharing Fahrzeuge ein neues Verkehrsangebot für den Personenverkehr werden. Infolgedessen könnten disruptive Technologien (d. h. eine Innovation, die bestehende Technologien verdrängt) entscheidende Entwicklungen beim Energiebedarf und den THG-Emissionen im Verkehrssektor verursachen. Gesellschaftliche Aspekte und Nutzerakzeptanz werden bei diesen neuen Mobilitätskonzepten eine wichtige Rolle spielen. Darüber hinaus werden neue nicht-technische Konzepte vorangetrieben (z.B. Stadt der kurzen Wege). Diese neuen Konzepte und Verkehrsangebote können ebenso das Mobilitätsverhalten ändern und den Gesamtverkehrssektor drastisch beeinflussen. Der Forschungsbedarf für neue Mobilitätskonzepte ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Forschungsbedarf zu neuen Mobilitätskonzepten.

<b>Forschungsbedarf</b>	<b>KUR</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>GPR</b>	<b>V</b>
Auswirkungen neuer Mobilitätskonzepte (inkl. Carsharing, Ridesharing, Mobility-as-a-Service und Robo-Taxis) im Alltagsverkehr auf den Energieverbrauch und die THG-Emissionen [9, 23, 62].	X			X	
Untersuchungen der Änderung des Mobilitätsverhaltens und Modal Splits durch nicht-technische Mittel, um den Energiebedarf und die THG-Emissionen im Personen- und Güterverkehr zu reduzieren (z.B. Verlagerung auf die Schiene, nichtmotorisierter Verkehr, reduzierte Nachfrage, Stadt der kurzen Wege) [26].	X			X	
Untersuchung des Nutzerverhaltens und der Nutzerakzeptanz bei neuen Mobilitätsformen (inkl. Carsharing, Ridesharing, Mobility-as-a-Service und Robo-Taxis) und die resultierenden Auswirkungen auf den Personenverkehr (z.B. Modal Split, Fahrleistungen [63, 64].				X	
Analyse der Einflüsse von neuen Fahrzeug- und Mobilitätskonzepten mit disruptivem Potenzial auf den Gesamtverkehrssektor (z.B. Drohnen für den Güterverkehr, Hyperloop) [65, 66].				X	

**KUR:** Klima, Umwelt und Ressourcen, **T:** Technische Aspekte, **W:** Wirtschaftliche Aspekte

**GPR:** Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte, **V:** Versorgungssicherheit

## 4 Analyse des 6. Energieforschungsprogramms

Das 6. Energieforschungsprogramm (EFP) „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ legte im Jahr 2011 die Schwerpunkte der Förderpolitik der Bundesregierung im Energiebereich fest [67]. Das 6. EFP konzentriert sich vor allem auf Forschung und Entwicklung im Bereich Energietechnologien. Dabei wurden die Themen Energieeffizienz, erneuerbare Energien und systemische Fragestellungen (u. a. Energieversorgung, Sektorkopplung) als Schwerpunktthemen identifiziert. Dieses Kapitel fasst die relevanten Themen des 6. EFP für den Verkehrssektor zusammen. Daraufhin wird der verkehrsspezifische Forschungsbedarf aus dem 6. EFP mit dem identifizierten Forschungsbedarf dieses Sektorsteckbriefs verglichen.

### 4.1 Bestandsaufnahme relevanter Förderthemen

Das 6. EFP ist nach Forschungsförderungen verschiedener Ressorts der Bundesregierung organisiert statt nach Sektoren. Nichtsdestotrotz sind verschiedene Forschungsthemen für den Verkehrssektor identifiziert worden. Das im 6. EFP formulierte Ziel für den Verkehrssektor ist die Reduzierung des Endenergieverbrauchs um 40 % bis 2050 gegenüber 2005. Um dieses Ziel erreichen zu können, werden verkehrsspezifische Förderthemen im 6. EFP in den Bereichen Energieeffizienz, Elektromobilität, Wasserstoff und Biokraftstoffe beschrieben.

Als erstes Förderthema mit Bezug zum Verkehr wurde Energieeffizienz als Schwerpunkt in der Grundlagenforschung im 6. EFP festgehalten. Um den steigenden Energiebedarf zu bewältigen, wurde die effiziente Nutzung fossiler Brennstoffe besonders im Verkehrsbereich angemerkt. Die starke Abhängigkeit des Verkehrssektors von fossilen Brennstoffen, vor allem im Straßenverkehr, bedarf neuer Forschung im Bereich alternativer Antriebe und Fahrzeugkonzepte. Darauf aufbauend wurde Elektromobilität als das zweite Förderthema des 6. EFP benannt. Bei dem Thema Elektromobilität wurde der Fokus auf Energiespeicher, elektrochemische Speicher auf Lithiumbasis und Netze für die Stromversorgung gesetzt.

Das dritte verkehrsspezifische Förderthema im 6. EFP beinhaltet die Weiterentwicklung der Wasserstofftechnologie und ihrer Anwendung. Für den Verkehrssektor wurde besonders die Entwicklung von Brennstoffzellen für Pkw und Busse betont. Darüber hinaus wurde der Forschungsbedarf für notwendige Wasserstoffbereitstellung und Wasserstoffspeicherung identifiziert. Letztlich sollten neue Systeme für die Bordstromversorgung (z. B. Auxiliary Power Unit) besonders für Lkw, Flugzeuge und Schiffe untersucht werden.

Als letztes Förderthema für den Verkehr wurden Biokraftstoffe detailliert betrachtet. Das 6. EFP fordert die Entwicklung und Erprobung neuer, hoch energieeffizienter Herstellungsrouten zur Erzeugung von Biokraftstoffen. Dazu wurde die Entwicklung, Erprobung und Evaluierung von Kraftstoffmischungen mit variablem biogenem Anteil als ein notwendiger Forschungsbereich identifiziert. Zusätzlich wurde die Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten von biogenen Kraftstoffen in Bereichen außerhalb des straßengebundenen Verkehrs, wie Luft- und Schifffahrt oder Schienenverkehr, im 6. EFP angeführt.

## **4.2 Spiegelung des identifizierten Forschungsbedarfs**

Um die Umwelt- und Klimaziele der Bundesregierung erreichen zu können, hat das 6. EFP neue Förderbereiche festgelegt. Die Bereiche für den Verkehrssektor im 6. EFP sind Energieeffizienz, Elektromobilität, Wasserstoff und Biokraftstoffe. Im Vergleich hierzu stehen die identifizierten Maßnahmen dieses Steckbriefs: alternative Antriebe, alternative Kraftstoffe, Infrastruktur für alternative Antriebe, Sektorkopplung, autonomes Fahren, Digitalisierung und Vernetzung und neue Mobilitätskonzepte. In diesem Abschnitt werden die Überschneidungen und Unterschiede zwischen dem Forschungsbedarf des 6. EFP und dem des Steckbriefs untersucht und beschrieben.

Der Vergleich des identifizierten Forschungsbedarfs mit dem 6. EFP stellt einige Gemeinsamkeiten fest. Der Forschungsbedarf für alternative Antriebe, alternative Kraftstoffe, Infrastruktur für alternative Antriebe und teilweise Sektorkopplung überlappen sich mit Bereichen aus dem 6. EFP. Insbesondere sind die Bereiche Elektromobilität, Wasserstoff und Biokraftstoffe in beiden Dokumenten festgehalten. Allerdings haben sich die Technologien in diesen Bereichen seit 2011 zusehends weiterentwickelt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Dokumenten ist der heutigen Fokus auf sektorübergreifende Forschung statt einzelner Technologien (z.B. Sektorkopplung durch Elektrofahrzeuge).

Darüber hinaus unterscheiden sich das 6. EFP und der Steckbrief wesentlich, da das 6. EFP den Schwerpunkt auf Technologien gesetzt hat. Im Vergleich hierzu befasst sich der Steckbrief zusätzlich mit nicht-technischen und gesellschaftlichen Aspekten (z.B. Nutzerakzeptanz). Der Verkehrssektor benötigt nicht nur technische Forschung, sondern auch ökonomische sowie sozialwissenschaftliche Forschung um Klima- und Energieziele zu erreichen. Darüber hinaus umfasst der Steckbrief die neu entstandenen Forschungsthemen im Verkehr. Dabei handelt es sich insbesondere um das autonome Fahren sowie die Digitalisierung und Vernetzung und neue Mobilitätskonzepte.

## 5 Fazit

Der Verkehrssektor spielt eine wichtige Rolle bei der Erreichung diverser Energie- und Klimaziele in Deutschland. Zusätzlich zur energiewirtschaftlichen Bedeutung spielt der Verkehr eine tragende gesellschaftliche Rolle. Um den Endenergieverbrauch und die THG-Emissionen im Sektor Verkehr zu reduzieren, sollte die allgemeine Mobilität der Bevölkerung und der Wirtschaft nicht eingeschränkt werden. Stattdessen sollte das Mobilitätsangebot im Personen- und Güterverkehr verbessert werden, um das Erreichen der sektorspezifischen Ziele zu unterstützen.

Dieser Sektorsteckbrief beschreibt die Charakterisierung des Verkehrssektors. Zuerst wird der Verkehrssektor definiert und den anderen Sektoren gegenübergestellt. Anschließend wird die energiewirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung des Sektors aufgezeigt und die technischen und sozioökonomischen Entwicklungen zusammengefasst. Die Entwicklung der verkehrsspezifischen THG-Emissionen in Deutschland verdeutlicht die Bedeutung des Straßenverkehrs auf die Gesamtemissionen. Gleichzeitig ergibt sich eine Vielzahl an neuen Entwicklungen und Trends im Bereich Verkehr, unter anderem alternative Antriebe, alternative Kraftstoffe, Elektromobilität, autonomes Fahren und neue Mobilitätskonzepte.

Im Anschluss an die Sektorbeschreibung werden die Herausforderungen für den Verkehrssektor anhand der Energie- und Klimaziele Deutschlands abgeleitet. Daraufhin werden sechs Maßnahmen mit dem relevanten Forschungsbedarf zur Zielerreichung im Detail beschrieben. Die resultierenden Maßnahmen für den Verkehrssektor sind *alternative Antriebe*, *alternative Kraftstoffe*, *Infrastruktur für alternative Antriebe*, *Sektorkopplung*, *Autonomes Fahren*, *Digitalisierung und Vernetzung* und *neue Mobilitätskonzepte*. Der sich daraus ergebende Forschungsbedarf mündet in einem konkreten Maßnahmenkatalog. Abschließend wird das 6. Energieforschungsprogramm analysiert und diskutiert. Ein Blick auf die Forschungsschwerpunkte für den Verkehrssektor innerhalb des 6. Energieforschungsprogramms zeigt, dass sich der erforderliche Forschungsbedarf über die dort festgesetzten Forschungsfelder erweitert hat.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufteilung der indirekten energiebedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen aus der Energiewirtschaft durch Strombezug und Anteil der direkten und indirekten Emissionen in den Endenergiesektoren 2014 [6].	3
Abbildung 2: Entwicklung der verkehrsspezifischen THG-Emissionen in Deutschland (ohne Luft- und Schiffsverkehr) [4].	7
Abbildung 3: Entwicklung der THG-Emissionen im Verkehr in Deutschland im Vergleich mit unterschiedlichen Klimazielen (Quellen: THG-Emissionen im Verkehr [4], Energiekonzept [10]).	8
Abbildung 4: Sektorale Aufteilung des einzusparenden Endenergiebedarfs. Die EEV im Verkehr für das THGND Szenario bleibt fast unverändert, da hier der internationale Flug- und Seeverkehr mitbilanziert wurde [20].	9
Abbildung 5: Endenergiebedarf im Verkehrssektor 2010 und 2030 abhängig vom Szenario (Werte in Tabelle 10 im Anhang) [20].	9
Abbildung 6: Sektorale Aufteilung der einzusparenden THG-Emissionen in 2050 [20]. Der Wert von über 100 % bei Industrie im „KSZ-KS95“-Szenario liegt an den negativen Emissionen der Biomassenutzung als Carbon Capture and Storage bei Biogasanlagen [20].	10
Abbildung 7: THG-Emissionen im Verkehrssektor 2030 und 2050 abhängig vom Szenario (Werte in Tabelle 11 im Anhang) [20].	11

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: THG-Emissionen in Deutschland je nach Zieldefinition einbezogenen Handlungsfelder [3].....	2
Tabelle 2: Zusammenfassung von Energie- und Klimazielen für den Sektor Verkehr in Deutschland.....	6
Tabelle 3: Forschungsbedarf zu alternativen Antrieben.....	13
Tabelle 4: Forschungsbedarf zu den alternativen Kraftstoffen.....	14
Tabelle 5: Forschungsbedarf zur Infrastruktur für alternative Antriebe.....	15
Tabelle 6: Forschungsbedarf zur Sektorkopplung.....	16
Tabelle 7: Forschungsbedarf zum Autonomen Fahren, Digitalisierung und Vernetzung.....	18
Tabelle 8: Forschungsbedarf zu neuen Mobilitätskonzepten.....	19
Tabelle 9: Szenarien für den Klimaschutz in Deutschland [20].....	31
Tabelle 10: Endenergiebedarf im Verkehrssektor 2010 und 2030 abhängig vom Szenario (PJ/a) [20].....	31
Tabelle 11: THG-Emissionen im Verkehrssektor 2030 und 2050 abhängig vom Szenario (Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq.) [20].....	31

## Abkürzungsverzeichnis

Äq.	Äquivalent
BEV	Reines Elektrofahrzeug (Englisch: Battery Electric Vehicle)
CNG	Erdgas (Englisch: Compressed natural gas)
E-Fahrzeug	Elektrofahrzeug
EEV	Endenergieverbrauch
EFP	Energieforschungsprogramm
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GPR	Gesellschaftliche, politische und rechtliche Aspekte
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KUR	Klima, Umwelt und Ressourcen
Lkw	Lastkraftwagen
LPG	Autogas (Englisch: Liquefied Petroleum Gas)
PHEV	Aufladbares Hybrid Fahrzeug (Englisch: Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
Pkw	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
T	Technische Aspekte
THG	Treibhausgas
V	Versorgungssicherheit
W	Wirtschaftliche Aspekte

## Literaturangaben

- [1] H. Ammoser and M. Hoppe, "Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften (Nr.2/2006). Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr," Technische Universität Dresden 2006.
- [2] Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, *et al.*, "Transport," in *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, *et al.*, Eds., ed Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, "Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung," 2016.
- [4] Umweltbundesamt, "Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2015," 2017.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, "Energiedaten: Gesamtausgabe (Stand Oktober 2017)," 2017.
- [6] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., "Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz," vol. 03, ed. BWK: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2017, pp. 38-42.
- [7] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Verkehr in Zahlen 2017/2018 (46. Jahrgang)," 2017.
- [8] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Schlussbericht," 2014.
- [9] S. Rommerskirchen, N. Anders, A. Auf der Maur, O. Ehrentraut, L. Krämer, S. Straßburg, *et al.*, "Shell PKW-Szenarien bis 2040: Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität," 2014.
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, "Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung," Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin 2010.
- [11] Kraftfahrt-Bundesamt;. (2017, 15 July 2017). *Neuzulassungsbarometer im Juni 2017*. Available: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2017/201706\\_GV1monatlich/201706\\_nzbarometer/201706\\_n\\_barometer.html;jsessionid=A418E01C5C55201750E8D555978BFB3E.live11292?nn=653844](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2017/201706_GV1monatlich/201706_nzbarometer/201706_n_barometer.html;jsessionid=A418E01C5C55201750E8D555978BFB3E.live11292?nn=653844)
- [12] Kraftfahrt-Bundesamt. (2017, 15 July 2017). *Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2017*. Available: [http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand\\_node.html](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html)
- [13] J. E. Anderson, M. Bergfeld, N. Hoffmann, T. Kuhnimhof, B. Lenz, F. Steck, *et al.*, "LADEN2020 Schlussbericht: Konzept zum Aufbau einer bedarfsgerechten Ladeinfrastruktur in Deutschland von heute bis 2020," Berlin, Germany 15.12.2016 2016.

- [14] Europäisches Parlament, "Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG," 2009.
- [15] Europäisches Parlament, "Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG des Rates," 1998.
- [16] Europäische Kommission, "Weißbuch: Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem, KOM(2011)," 2011.
- [17] Europäische Kommission, "Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaft bis 2050," 2011.
- [18] Europäisches Parlament, "Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen," 2009.
- [19] Europäisches Parlament, "Verordnung (EU) Nr. 510/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2011 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue leichte Nutzfahrzeuge im Rahmen des Gesamtkonzepts der Union zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen," 2011.
- [20] Öko-Institut Fraunhofer ISI, "IREES 2016 - Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050 " 2016.
- [21] DLR, Fraunhofer IWES, and IFNE, "Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global," 2012.
- [22] Umweltbundesamt, "Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050," 2016.
- [23] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, "Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende: Die Energie der Zukunft (Berichtsjahr 2015)," 2016.
- [24] A. M. Andwari, A. Pesiridis, S. Rajoo, R. Martinez-Botas, and V. Esfahanian, "A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 414-430, 2017.
- [25] T. Franke, M. Günther, M. Trantow, and J. F. Krems, "Does this range suit me? Range satisfaction of battery electric vehicle users," *Applied Ergonomics*, vol. 65, pp. 191-199, 2017.
- [26] Öko-Institut e.V., DLR, IFEU, and Infras, "Endbericht Renewability III: Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors," 2016.
- [27] C. Xu, W. Zhang, W. He, G. Li, J. Huang, and H. Zhu, "Generation and management of waste electric vehicle batteries in China," *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1-6, 2017.
- [28] T. W. Gnann, Martin; Kühn, André; Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Stütz, Sebastian; Schellert, Maximilian; Rüdiger, David; Waßmuth, Volker; Paufler-Mann, Daniela, "Teilstudie: Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential

- (Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie)," Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe 2017.
- [29] F. Orsi, M. Muratori, M. Rocco, E. Colombo, and G. Rizzoni, "A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions: Primary energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions, and economic cost," *Applied Energy*, vol. 169, pp. 197-209, 2016.
- [30] Verband der Automobilindustrie, "Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft," Frankfurt am Main 2009.
- [31] P. W. Schmidt, Werner; Roth, Arne; Batteiger, Valentin; Riegel, Florian "Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel," German Environment Agency, Dessau 2016.
- [32] T. Donato, A. Ficarella, L. Spedicato, A. Arista, and M. Ferraro, "A new approach to calculating endurance in electric flight and comparing fuel cells and batteries," *Applied Energy*, vol. 187, pp. 807-819, 2017.
- [33] B. Sarlioglu and C. T. Morris, "More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, pp. 54-64, 2015.
- [34] I. Rahman, P. M. Vasant, B. Singh M. Singh, M. Abdullah-Al-Wadud, and N. Adnan, "Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1039-1047, 5// 2016.
- [35] A. Barisa, M. Rosa, and A. Kisele, "Introducing Electric Mobility in Latvian Municipalities: Results of a Survey," *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 50-57, 9// 2016.
- [36] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Nationaler Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe als Teil der Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU," Berlin 2016.
- [37] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Fachworkshop im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS): Stand der Forschung, Marktpotenziale und Forschungsbedarf für Brennstoffzellen-Lkw," Berlin 2016.
- [38] e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, "Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität: Entwicklungsstand und Forschungsbedarf," Stuttgart 2013.
- [39] K. Laurischkat, D. Jandt, and A. Viertelhausen, "Dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle für die Elektromobilität," in *Smart Service Engineering*. vol. 12, O. N. Thomas, Markus; Fellmann, Michael Ed., ed Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, pp. 258-281.
- [40] J. Dumortier, M. W. Kent, and S. B. Payton, "Plug-in vehicles and the future of road infrastructure funding in the United States," *Energy Policy*, vol. 95, pp. 187-195, 2016.
- [41] T. Yang, R. Long, W. Li, and S. U. Rehman, "Innovative application of the public-private partnership model to the electric vehicle charging infrastructure in China," *Sustainability*, vol. 8, p. 738, 2016.

- [42] D. Madzharov Nikolay and S. Nemkov Valentin, "Technological inductive power transfer systems," in *Journal of Electrical Engineering* vol. 68, ed, 2017, p. 235.
- [43] I. Karakitsios, E. Karfopoulos, and N. Hatziaargyriou, "Impact of dynamic and static fast inductive charging of electric vehicles on the distribution network," *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 107-115, 2016.
- [44] T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez, and A. H. Strømman, "Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, pp. 53-64, 2013.
- [45] H. Helms, J. Joehrens, J. Hanusch, U. Hoepfner, U. Lambert, and M. Pehnt, "UMBRéLA - Umweltbilanzen Elektromobilität Ergebnisbericht," Heidelberg 2011.
- [46] H. Huo, H. Cai, Q. Zhang, F. Liu, and K. He, "Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: A comparison between China and the U.S.," *Atmospheric Environment*, vol. 108, pp. 107-116, 5// 2015.
- [47] J. Archsmith, A. Kendall, and D. Rapson, "From Cradle to Junkyard: Assessing the Life Cycle Greenhouse Gas Benefits of Electric Vehicles," *Research in Transportation Economics*, vol. 52, pp. 72-90, 10// 2015.
- [48] C. Tagliaferri, S. Evangelisti, F. Acconcia, T. Domenech, P. Ekins, D. Barletta, *et al.*, "Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 112, pp. 298-309, 8// 2016.
- [49] K. Purr, D. Osiek, M. Lange, and K. Adlunger, "Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess (Position März 2016)," Umweltbundesamt, Dessau 2016.
- [50] U. Bünger, H. Landinger, E. Pschorr-Schoberer, P. Schmidt, W. Weindorf, J. Jöhrens, *et al.*, "Power-to-Gas (PtG) im Verkehr: Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven," Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. 2014.
- [51] K. M. Tan, V. K. Ramachandaramurthy, and J. Y. Yong, "Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 720-732, 2016.
- [52] R. Mehta, D. Srinivasan, A. Khambadkone, J. Yang, and A. Trivedi, "Smart charging strategies for optimal integration of plug-in electric vehicles within existing distribution system infrastructure," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016.
- [53] N. S. Pearre and L. G. Swan, "Electric vehicle charging to support renewable energy integration in a capacity constrained electricity grid," *Energy Conversion and Management*, vol. 109, pp. 130-139, 2016.
- [54] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Forschungsprogramm zur Automatisierung und Vernetzung im Straßenverkehr," Berlin 2016.
- [55] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, "Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren: Leitanbieter bleiben, Leitmarkt werden, Regelbetrieb einleiten," Berlin 2015.
- [56] J. Hu, Y. Shao, Z. Sun, M. Wang, J. Bared, and P. Huang, "Integrated optimal eco-driving on rolling terrain for hybrid electric vehicle with vehicle-infrastructure

- communication," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 68, pp. 228-244, 2016.
- [57] D. J. Fagnant and K. Kockelman, "Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 77, pp. 167-181, 2015/07/01/ 2015.
- [58] O. Mitrea and K. Kyamakya, "(How) will autonomous driving influence the future shape of city logistics?," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 15, pp. 45-52, 2017.
- [59] C. Rödel, S. Stadler, A. Meschtscherjakov, and M. Tscheligi, "Towards autonomous cars: the effect of autonomy levels on acceptance and user experience," in *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 2014, pp. 1-8.
- [60] N. Merat, R. Madigan, and S. Nordhoff, "Human Factors, User Requirements, and User Acceptance of Ride-Sharing in Automated Vehicles," in *International Transport Forum Roundtable on Cooperative Mobility Systems and Automated Driving*, 2016, pp. 6-7.
- [61] A. L. Kun, S. Boll, and A. Schmidt, "Shifting gears: User interfaces in the age of autonomous driving," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 15, pp. 32-38, 2016.
- [62] Umweltbundesamt, "Nutzen statt Besitzen: Neue Ansätze für eine Collaborative Economy," p. 248, 2015.
- [63] V. Caiati, P. Jittrapirom, A.-M. Feneri, S. Ebrahimigharehbaghi, J. Narayan, and M. Alonso González, "Mobility as a Service," *Urban Planning*, vol. 2, 2017.
- [64] P. Jittrapirom, V. Caiati, A.-M. Feneri, S. Ebrahimigharehbaghi, M. J. A. González, and J. Narayan, "Mobility as a Service: A Critical Review of Definitions, Assessments of Schemes, and Key Challenges," *Urban Planning*, vol. 2, pp. 13-25, 2017.
- [65] R. Palacin, "Hyperloop, the Electrification of Mobility, and the Future of Rail Travel," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, pp. 4-51, 2016.
- [66] Z. B. Ramadan, M. F. Farah, and M. Mrad, "An adapted TPB approach to consumers' acceptance of service-delivery drones," *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 29, pp. 817-828, 2017.
- [67] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, "Forschung für eine umweltschonende zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung: Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung," 2011.

## Anhang

Tabelle 9: Szenarien für den Klimaschutz in Deutschland [20].

Referenzszenarien	THG-Minderungsziel in 2050	Abkürzung
Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Referenzszenario, Trendszenario	-	ERP-Ref
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Aktuelle Maßnahmen Szenario	-	KSZ-AMS
<b>Zielszenarien</b>		
Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose, Zielszenario	80 % (1)	ERP-Ziel
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 80	80 %	KSZ-KS80
Klimaschutzszenarien 2. Runde, Klimaschutzszenario 95	95 %	KSZ-KS95
Klimaschutzszenarien 1. Runde, Klimaschutzszenario 90	90 %	KSZ-KS90
Leitstudie 2011, Szenario A	80 %	LS 2011-A
Leitstudie 2011, Szenario THG95	95 % (2)	LS 2011-THG95
Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050	95 %	THGND

(1) nur energiebedingte Emissionen

(2) Ziel wird erst 2060 erreicht

Tabelle 10: Endenergiebedarf im Verkehrssektor 2010 und 2030 abhängig vom Szenario (PJ/a) [20].

	2010	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95	THGND
<b>2030</b>	2,266	2,219	2,017	1,801	1,553	1,512	1,447	1,973	1,846	-
<b>2050</b>	2,266	1,904	1,547	1,529	1,016	1,023	809	1,521	1,217	2,248

Tabelle 11: THG-Emissionen im Verkehrssektor 2030 und 2050 abhängig vom Szenario (Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.) [20].

	1990	ERP – Ref	ERP – Ziel	KSZ – AMS	KSZ – KS80	KSZ – KS90	KSZ – KS95	LS 2011 – A	LS 2011 – THG95	THGND
<b>2030</b>	165	116	93	114	96	81	89	-	165	116
<b>2050</b>	165	87	38	90	32	24	3	0	165	87

## **A.6. Sektorübergreifende Themen in der Energieforschung**

# **Sektorübergreifende Themen in der Energieforschung**

## **Strategisches Leitprojekt**

### **Trends und Perspektiven der Energieforschung**

Teilprojekt:

Methodenentwicklung und -anwendung zur Priorisierung von Themen und  
Maßnahmen in der Energieforschung im Kontext der Energiewende

(FKZ 03ET4036 X-Z)

#### **Autorinnen und Autoren:**

Prof. Dr. Karen Pittel, Dr. Johannes Pfeiffer, Christoph Weissbart, Dr. Markus Zimmer

*ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V.*

*ifo Zentrum für Energie, Klima und Ressourcen*

*Poschingerstraße 5, 81679 München*

Prof. Dr. Andreas Löschel

*Universität Münster*

*Lehrstuhl für Mikroökonomik, insb. Energie- und Ressourcenökonomik*

*Am Stadtgraben 9, 48143 Münster*

Dr.-Ing. Christoph Pelling

*FfE*

*Am Blütenanger 71, 81671 München*

**Disclaimer:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET4036 X-Z durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

**Kontakt:**

Prof. Dr. Karen Pittel  
ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung  
an der Universität München e.V.  
ifo Zentrum für Energie, Klima und Ressourcen  
Poschingerstr. 5, 81679 München

**Gefördert durch:**

Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>1     Gesellschaftliche Trends und aktuelle Entwicklungen in den       Rahmenbedingungen der Energieforschung .....</b>	<b>1</b>
<b>2     Sektorübergreifende Herausforderungen und Forschungsfragen .....</b>	<b>4</b>
2.1   Digitalisierung .....	4
2.2   Geschäftsmodelle .....	11
2.3   Akzeptanz .....	18
2.4   Energienachfragverhalten (Nicht-technische Hemmnisse) .....	23
2.5   Energiesystemischer Ansatz .....	30
2.6   Regulatorischer Rahmen .....	36
<b>3     Adressierung im sechsten EFP .....</b>	<b>45</b>
<b>Literaturangaben.....</b>	<b>51</b>

# 1 Gesellschaftliche Trends und aktuelle Entwicklungen in den Rahmenbedingungen der Energieforschung

Das übergeordnete Ziel der Energieforschung, auch im Sinne dieser Studie, stellt die Umsetzung der klima- und energiepolitischen Ziele dar. Die angestrebte Dekarbonisierung des Energiesystems ist in den verschiedenen Sektoren mit unterschiedlichen und zum Teil noch erheblichen technischen Herausforderungen verbunden, wie die Analysen in den Sektorsteckbriefen zu den Sektoren private Haushalte, Gewerbe-Handel-Dienstleistungen, Industrie, Energiewandlung und Verkehr illustrieren. Die Herausforderungen, die dieser Systemumbau mit sich bringt, gehen jedoch über spezifische technische Probleme in einzelnen Sektoren hinaus. Schon über die letzten Jahre wurde angesichts des dynamischen Aufbaus erneuerbarer Erzeugungskapazitäten deutlich, dass große Herausforderungen für die weitere Umsetzung der Energiewende auch in sektorübergreifenden und nicht-technischen Fragestellungen liegen. Dies folgt zum einen aus den übergeordneten (sektorübergreifenden) Implikationen der Dekarbonisierung des Energieversorgungssystems als dem zentralen Treiber. Zum anderen stehen die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen mit dem gesellschaftlichen Wandel und der Digitalisierung zusätzlich unter dem direkten Einfluss weiterer, grundsätzlich sektorübergreifender und nicht allein technischer Entwicklungen/Faktoren.

Die Dekarbonisierung des Energiesystems erfordert über alle Sektoren hinweg einen starken Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Da sich diese jedoch vielfach in ihren technischen und wirtschaftlichen Charakteristika von den konventionellen Formen der Energiebereitstellung auf Basis fossiler Ressourcen unterscheiden, führt ihr Ausbau zu einer grundlegenden Neugestaltung des Versorgungssystems. Über die notwendige Elektrifizierung von Anwendungen zur Substitution fossiler Energieträger entstehen neue Interdependenzen zwischen den Sektoren und bisherige sektorale Abgrenzungen lösen sich, zumindest bis zu einem gewissen Grad, auf. Zugleich gewinnen dezentrale Strukturen durch den Ausbau der erneuerbaren Energie an Bedeutung, beispielsweise aufgrund ihrer geringeren Energiedichte oder neuer Möglichkeiten der Eigenversorgung. Die abnehmende Plan- und Steuerbarkeit der Energieerzeugung im Zuge der höheren Abhängigkeit von wetterabhängigen Energieressourcen ziehen einen erheblich steigenden Bedarf an Flexibilität sowie allgemein neue Anforderungen bei der Gewährleistung von Versorgungssicherheit nach sich (für einen Überblick über die Implikationen vgl. auch [1]). Verschärfend wirken in diesem Zusammenhang die vermehrt bidirektionalen Stromflüsse zwischen Verbrauchern (Prosumern) und Versorgungsnetz bzw. auch zwischen verschiedenen Netzebenen, auf die bislang weder die Versorgungsinfrastruktur noch die Abrechnungsmodelle ausgelegt sind.

So sind in der Dekarbonisierung des Energiesystems mit der notwendigen Sektorkopplung bzw. Elektrifizierung, dem steigenden Flexibilitätsbedarf und der zunehmenden Dezentralität Entwicklungen angelegt, die nach einer systemischen, sektorübergreifenden Betrachtung verlangen. In den Fokus rücken dabei insbesondere Fragen der geeigneten Abstimmung und Koordination zwischen den einzelnen Anwendungssektoren, zwischen den unterschiedlichen Ebenen des Versorgungssystems (Energiebereitstellung, -Übertragung, -Nachfrage) sowie zwischen den stärker verteilten und differenzierten Systemteilnehmern. Darüber hinaus können sich Rolle und Geschäftskonzepte energiewirtschaftlicher Unternehmen verändern und es stellen sich Fragen nach der Bereitschaft von Unternehmen und Verbrauchern, diese Veränderungen anzunehmen und zu unterstützen, auch wenn dazu teilweise verfestigte Verbrauchs- und Nutzungsgewohnheiten angepasst werden müssen.

Diese primär klima- und energiepolitisch angestoßenen Implikationen des Umbaus des Versorgungssystems treffen auf ein neues Bewusstsein der privaten Verbraucher/Bürger für das Thema Energie bzw. Energieversorgung generell. Energie und die eigene Energieversorgung wandeln sich zunehmend zu einem „high involvement“ Produkt, für das möglichst individualisierte Angebote und Lösungen gewünscht werden. Dieses neue Bewusstsein zeigt sich auch in einem starken Willen zur Beteiligung und Gestaltung des Umbaus des Versorgungssystems (vgl. auch [2] oder [3]). Zahlreiche Bürgerinitiativen und Proteste verdeutlichen, dass ein Umbau des Versorgungssystems gegen die Präferenzen der Bevölkerung nur schwer gelingen kann. Neben Fragen der Akzeptanz einzelner technischer Lösungen ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Präferenz für regionale Versorgungslösungen, oder im Extremfall für Möglichkeiten der Eigenversorgung, von hoher Bedeutung für die Ausgestaltung des zukünftigen Versorgungssystems.

Parallel und zunächst unabhängig von den klima- und energiepolitischen Zielsetzungen stehen die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen schließlich unter dem Einfluss der fortschreitenden Digitalisierung. Dies gilt sowohl für die Digitalisierung des Energiesystems bzw. der Energiewirtschaft selbst als auch für die Folgen, die sich aus der zunehmenden Durchdringung aller Sektoren, Lebensbereiche und Anwendungen von Energie mit digitalen Technologien ergeben. Im Energiesektor wird die Digitalisierung schon durch den Wandel in den Ansprüchen und Präferenzen der Energieverbraucher vorangetrieben, ähnlich wie in anderen Branchen (etwa Banken): Verstärkt erwartet werden ein möglichst direkter und zeitlich flexibler Kundenkontakt, einfache Versorgungs- und Vertrags-(Abrechnungs-)Lösungen mit Hilfe digitaler Kommunikationsmittel (z.B. [4], [5]) sowie zunehmend differenzierte und individuelle Angebote der Energieversorgung (vgl. oben). Die Digitalisierung verändert so bestehende und schafft neue Geschäftsmodelle auf allen energiewirtschaftlichen Wertschöpfungsstufen. Sie öffnet den Energiemarkt auch für bislang branchenfremde Unternehmen und führt damit zu ver-

schärftem Wettbewerb und zusätzlichen, über die Umsetzung der klima- und energiepolitischen Zielsetzungen hinausgehenden Anpassungsherausforderungen für die Energiewirtschaft. Einen Treiber der Digitalisierung in der Energiewirtschaft stellen aber auch die klima- und energiepolitischen Ziele dar. Die Digitalisierung eröffnet in diesem Zusammenhang große Chancen für die Gestaltung eines effizienten und flexiblen dekarbonisierten Energiesystems, das zugleich dem Verbraucherinteresse an individualisierten und dezentralen Versorgungslösungen gerecht wird. Sie ist aber auch mit manchen Risiken verbunden, etwa im Hinblick auf den Datenschutz und die Sicherheit (Resilienz) der neuen, digital vernetzten Energieinfrastruktur vor Cyberattacken. Insbesondere mit Blick auf die Chancen und Risiken für die Umsetzung der Energiewende und den daraus erwachsenden Forschungsbedarf wird die Digitalisierung im folgenden Kapitel 2.1 separat und eingehender diskutiert.

## 2 Sektorübergreifende Herausforderungen und Forschungsfragen

Der Forschungsbedarf zu sektorübergreifenden Themen leitet sich stark aus den in Kapitel 1 skizzierten Veränderungen der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen durch die Dekarbonisierung des Energiesystems, die Veränderung von Präferenzen und Bewusstsein auf der Nachfrageseite sowie der Digitalisierung ab. Wie die folgenden Abschnitte deutlich machen, bemisst sich der Forschungsbedarf dabei weit weniger an konkreten Vermeidungspotentialen als etwa manche Forschungsfragen in den Anwendungssektoren oder auf Seiten der Energiebereitstellung. Gleichwohl stellen viele der angesprochenen Themen durchaus kritische Herausforderungen („Flaschenhälse“) für die weitere Dekarbonisierung des Energiesystems dar. Diese reichen von den Themen Digitalisierung, der Frage der Veränderung und Entstehung von energiewirtschaftlichen Geschäftsmodellen über Fragen der Akzeptanz und dem Energieverbrauchsverhalten bis hin zur Notwendigkeit eines energiesystemischen Ansatzes und der notwendigen Neugestaltung bzw. Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen. Ein Abgleich der diskutierten Gesichtspunkte mit dem bisherigen, sechsten Energieforschungsprogramm erfolgt im nachfolgenden Kapitel 3.

### 2.1 Digitalisierung

Bezüglich der in Kapitel 1 eingeführten Entwicklungslinien lässt sich die Marktdynamik, die aus der Marktintegration von digitalen Anwendungen resultiert, in unterschiedliche Stränge unterteilen. Zum einen werden digitale und intelligente Technologien in den Markt eingeführt, die bisherige Akteursstrukturen teilweise anpassen. Darunter fallen beispielsweise die sogenannten virtuellen Kraftwerke, die bestehende Akteure zusammenschließen, wie auch die Blockchain-Technologie, durch die vor allem der Energiehandel weitgehend automatisiert werden kann [6].

Parallel dazu ist die Digitalisierung und Automatisierung bestehender, analoger Anwendungen zu beobachten. Diese Entwicklung zeigt sich u.a. in der Marktintegration von intelligenten Stromzählern, sogenannten Smart Meters [7]. Die entsprechenden Automatisierungsbestrebungen können wiederum eine Verschiebung von komparativen Vorteilen mit sich bringen. Marktteilnehmer, die Wissen und Implementierungsstrategien zu digitalen Anwendungen in anderen Sektoren entwickelt haben, können so eine neue Position in den Energiemärkten einnehmen und neue Konkurrenz für etablierte energiewirtschaftliche Akteure bedeuten.

Neben der Markt- und Akteursstruktur des Stromsektors beeinflussen digitale und automatisierte Anwendungen vor allem auch den Verkehrssektor und dessen Integration in

den Strommarkt. In diesem Kontext sind insbesondere autonome Fahrzeuge zu nennen und deren Einfluss auf die Mobilitätsnachfrage (vgl. Sektorsteckbrief Verkehr). Die Verfügbarkeit von autonomen Fahrzeugen in Verbindung mit bestehenden, jedoch vernetzten Verkehrsmitteln ermöglicht die Ausgestaltung neuer Mobilitätskonzepte, die u.a. die Koppelung einzelner Verkehrsmittel beinhalten können.

Die genannten Digitalisierungsbestrebungen resultieren in einer fundamentalen Verbreiterung der Datenbasis auf der Angebots- und Nachfrageseite von Energiemärkten. Sie erlauben den Einsatz neuer Methoden der Datenauswertung, z.B. von Machine Learning Algorithmen, Prognosen des Akteursverhaltens zu verbessern und Energiedienstleistungen zu individualisieren [8].

Insgesamt erzeugen die Entwicklungen rund um das Thema Digitalisierung neue Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und Flexibilisierung. Digitalisierung wirkt zum einen entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Energiebereich und erfüllt somit eine Unterstützungsfunktion [4]. Jedoch bringt die breite digitale Vernetzung von Energieanwendungen neue Herausforderungen mit sich: In einem digitalisierten und weitreichend automatisierten Energiesystem müssen Fragen der (Versorgungs-)Sicherheit in einem breiteren Kontext betrachtet werden. So eröffnet die Verfügbarkeit von Mikrodaten nicht nur die beschriebenen Potentiale, sondern erfordert die Gewährleistung von Datensicherheit und die Definition und Durchsetzung von klaren Eigentumsrechten an jeder Art von Daten [9]. In Bezug auf die Systemsicherheit von Energiemärkten ist die Neubetrachtung der Versorgungssicherheit sowie die Integration von Konzepten der IT- und Cybersicherheit notwendig [4].

Die Umsetzung der Ziele der Energiewende im Einklang mit den Zielen des energiewirtschaftlichen Zieldreiecks erfordert die Kombination verschiedener Vermeidungs- und Anpassungsstrategien wie Energie- und Ressourceneffizienz, Flexibilisierung oder Sektorkopplung in allen Bereichen des Energiesystems (vgl. auch Kapitel 1). Der Digitalisierung kann dabei eine unterstützende Funktion zukommen, die mit diesen Vermeidungs- und Anpassungsstrategien verknüpften (CO<sub>2</sub>-Einspar-)Potentiale zu heben. Deshalb wird der Forschungsbedarf im Bereich digitalisierter und automatisierter Anwendungen im Folgenden im Kontext dieser einzelnen Anpassungsmöglichkeiten und der übergeordneten Themen von Sicherheitskonzepten und Analysemethoden diskutiert.

### **2.1.1 Steigerung der Systemflexibilität**

Die fluktuierende erneuerbare Energieerzeugung in Verbindung mit einer wenig flexiblen Nachfrageseite und beschränkten Netzkapazitäten erschwert die Substitution konventioneller Kraftwerke und die Marktintegration zusätzlicher erneuerbarer Erzeugungseinheiten. Hier kann der Einsatz von digitalisierten Anwendungen zur Flexibilisierung beider Marktseiten beitragen (vgl. auch Kapitel 2.5 zu Sektorkopplung und Flexibilitätsoptionen

im Energiesystem). Im Rahmen bisheriger Energieforschung gab es bereits erste Ansätze zur Abschätzung des tatsächlichen Potentials zur Flexibilisierung der Nachfrageseite nach Anwendungssektoren [10], es verbleibt jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf bei der Bewertung des regionalen und sektoralen Potentials von Demand Side Management. Die Potentiale sollten hier im Hinblick auf die bestehenden systemischen Zusammenhänge analysiert werden. Neben den technischen Potentialen sollten dabei vor allem ökonomische Potentiale analysiert werden und etwa bei der Analyse von Feedback-Systemen zu Energieverbrauch und/oder -Kosten vor allem auch sozioökonomische Einflussfaktoren berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 2.4.2 zur Nachfrageflexibilität unten). Eine besondere Bedeutung kommt dabei auch der Frage der geeigneten regulatorischen Rahmenbedingungen zur Hebung dieser Flexibilitätpotentiale zu.

Mit Blick auf die Echtzeitmessung und -steuerung der Nachfrageseite sollte sich die Energieforschung diesbezüglich auch der geeigneten, systemdienlichen Steuerung von Internet-of-Things-(IoT)-Geräten und automatisierten Industrieanwendungen zuwenden. So erfordern die mit IoT-Geräten verbundenen Automatisierungsmöglichkeiten Routinen zur aktiven Steuerung bzw. Senkung der Energienachfrage [11]. Hierfür sollten generische Strategien entwickelt werden, die eine breite Anwendung erlauben. Zumindest mittel- bis längerfristig ist dabei darüber hinaus zu beachten, dass die fortschreitende Automatisierung auch zu einer zunehmenden Unabhängigkeit der (Industrie-)Produktion von menschlicher Arbeit führt. Zu fragen ist in diesem Zusammenhang, ob und wie sich die Gewichtung einzelner Einflussfaktoren bei der Wahl von Produktionsstrukturen verändern und ob es zu einer räumlichen und zeitlichen Umverteilung von Energieanwendungen mit entsprechenden Implikationen für die Struktur der Energienachfrage kommen kann [8].

Neben der nachfrageseitigen Anpassung sollte zukünftig auch die Flexibilisierung durch Netzinfrastruktur und nachgelagerte Potentiale über die Aggregation von dezentralen Erzeugungseinheiten verstärkt betrachtet werden. In diesem Bereich besteht Forschungsbedarf vor allem hinsichtlich der Bewertung des Anpassungspotentials durch virtuelle Kraftwerke [12]. Diese zielen auf eine Verringerung von Fluktuationen und damit einer Reduktion des Flexibilitätsbedarfs durch die Aggregation von mehreren (kleinen) Marktakteuren, sowohl auf Angebots- als auch auf Nachfrageseite. Zu untersuchen sind in diesem Zusammenhang auch die bestehenden Marktstrukturen im Hinblick auf die Eignung für Verbreitung und Betrieb derartiger virtueller Kraftwerke (vgl. auch Kapitel 2.2).

Die wachsende Zahl dezentraler Energieerzeuger bei gleichzeitiger Auflösung der Abgrenzung von Energieerzeuger und -verbraucher erfordert neue Koordinations- und Abrechnungsmodelle zur Senkung der Transaktionskosten. Große Potentiale werden hier der Blockchain-Technologie zugesprochen, durch die eine weitreichende Automatisie-

rung des Energiehandels auch in sehr kleinteiligen Strukturen möglich wird [13]. Aufgrund der noch geringen Anzahl von Anwendungsbeispielen dieser Technologie in der Energiewirtschaft sind in diesem Bereich vor allem auch noch sehr grundlegende Fragestellungen zu klären. So sollte das Design geeigneter rechtlicher Rahmenbedingungen für die Anwendung der Blockchain-Technologie untersucht werden, da die weitreichende Automatisierung des Energiehandels das Aufbrechen bisheriger Zuweisungen von Verantwortlichkeiten mit sich bringt [14]. Dementsprechend müssen neue Verantwortlichkeiten anreizkompatibel definiert werden. Bislang wurde die Blockchain-Technologie zudem nur in kleineren Systemen angewandt. Die Skalierbarkeit der Blockchain-Technologie, d.h. ob und unter welchen Voraussetzungen die Technologie die physische Markträumung auch in größeren Systemen adäquat annähern kann, erscheint bislang aber noch unklar.

Im Zusammenhang mit der Vielzahl bestehender Flexibilitätsoptionen sollten auch die Interdependenzen zwischen den einzelnen Optionen, auch im Hinblick auf die mögliche Begründung (neuer) Pfadabhängigkeiten, untersucht werden. Beispielsweise können digitalisierte Anwendungen wie bereits angesprochen zur zeitlichen Flexibilisierung der Nachfrageseite beitragen. Eine ähnliche Flexibilisierung kann demgegenüber aber auch über den angebotsseitigen Zubau von schnell regelbaren Erzeugungskapazitäten zur Flexibilisierung auf unterschiedlichen Netzebenen des Stromsektors erzielt werden. Diesbezüglich sollte untersucht werden, in welcher Verbindung diese beiden Maßnahmen zueinander stehen und welche Rolle die stärkere Vernetzung von Angebots- und Nachfrageseite im Zuge der Digitalisierung dabei spielen kann (vgl. zur Abstimmung der verschiedenen Flexibilitätsoptionen als Forschungsthema auch die Kapitel 2.5 und 2.6).

Zusammenfassend ergeben sich bezüglich der Systemflexibilität durch digitalisierte Anwendungen die folgenden Schwerpunkte in der Energieforschung:

- Bewertung des Potentials von Demand Side Management und virtueller Kraftwerke.
- Abschätzung des Einflusses von automatisierten Industrieanwendungen und IoT Geräten auf die zeitliche und räumliche Verteilung der Energienachfrage.
- Ausgestaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen zur Zuteilung von Verantwortlichkeiten bei Einsatz der Blockchain-Technologie und Analyse der Anwendbarkeit der Blockchain-Technologie in Abhängigkeit der Marktgröße und des Anwendungsfalls.
- Bewertung der Substituierbarkeit zwischen Maßnahmen zur zeitlichen Flexibilisierung der Nachfrageseite und dem Zubau von Kapazitäten auf unterschiedlichen Netzebenen des Stromsektors.

### 2.1.2 Energieeffizienz

Aufgrund der beschriebenen Herausforderungen bei der Substitution von konventionellen Angebotsstrukturen ist auch der Reduktion des Energieverbrauchs bzw. zumindest einer hohen Energieeffizienz eine zentrale Rolle beizumessen. Vernetzte Messeinheiten können dazu beitragen, das Potential von Energieeffizienzinstallationen zu erhöhen und durch Nutzerverhalten induzierte Effizienzverluste zu reduzieren (vgl. Kapitel 2.4 oder Sektorsteckbriefe GHD und Industrie) [15], [16]. In diesem Zusammenhang sollte untersucht werden, ob und inwieweit digital vernetzte Anwendungen und Messeinheiten sowie Ansätze zur intelligenten, automatisierten Steuerung von Anwendungen eine Neubewertung von Energieeffizienzpotentialen erforderlich machen. Dies gilt auch im Hinblick auf die mögliche Vermeidung Nutzer-induzierter Effizienzverluste mit Hilfe automatisierter Anwendungen.

Vor allem im Hinblick auf den Verkehrssektor können digitalisierte bzw. automatisierte Technologien einen weitreichenden Einfluss auf die zukünftige Marktstruktur haben. So kann die Markteinführung von autonomen Fahrzeugen die Besitzstrukturen und das Nutzerverhalten von Kraftfahrzeugen fundamental verändern [17]. Diese Entwicklungen können wiederum zu einer völlig neuen Struktur und Quantität der Verkehrsnachfrage und insgesamt zu einer weitreichenden Änderung des Verkehrssystems führen. In welcher Form das autonome, vernetzte Fahren die Mobilitätsnachfrage und Verkehrssysteme verändern wird und von welchen Faktoren die konkrete Entwicklung abhängt, ist bislang aber noch weitgehend offen und bedarf entsprechend weitergehender Forschung (vgl. auch Sektorsteckbrief Verkehr).

Gleichermaßen können digitalisierte Anwendungen durch automatisierte Logistik- und Leitsysteme auf den Verkehrssektor einwirken [18]. Ihre Verwendung in Form von intelligenten Maut- und Logistiksystemen birgt das Potential, u.a. über die Übermittlung von Preissignalen die Energienachfrage aus dem Verkehrssektor systemdienlicher zu integrieren und über die intelligente Steuerung des Verkehrs den Verkehrsfluss zu verbessern und so Effizienzgewinne zu erzielen. Dabei gilt es zu untersuchen, wie groß die damit verbundenen Potentiale sind und welche zeitlichen und räumlichen Änderungen der Energienachfrage daraus resultieren (vgl. auch Sektorsteckbrief Verkehr).

In der Analyse der Potentiale digitalisierter Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz sollten jedoch auch deren zusätzlicher Energie- und Ressourcenverbrauch Berücksichtigung finden. Angesichts dieses Mehrverbrauchs durch Technologien wie etwa automatisierte Messtechniken oder der Blockchain-Technologie erscheint etwa der Netto-Effekt der Digitalisierung auf die Stromnachfrage insgesamt bislang unklar und sollte Gegenstand weiterer Analysen sein [19]. Zu beachten sind in diesem Zusammenhang auch drohende Rebound-Effekte, insbesondere auch im Verkehrssektor, in dem etwa Komfort- und Zeitgewinne durch autonomes Fahren und/oder intelligente Verkehrsleit-

systeme zu einer steigenden Mobilitätsnachfrage führen können. Schließlich können der Umsetzung der (technischen) Effizienzpotentiale der Digitalisierung auch Akzeptanzprobleme entgegenstehen, etwa bei zu geringem Vertrauen in den Datenschutz oder aufgrund von Befürchtungen über den Verlust von Entscheidungsautonomie im Zuge der Verbreitung automatisierter Anwendungen (vgl. Kapitel 2.4.2).

Zusammenfassend resultieren aus diesen Überlegungen die folgenden Forschungsschwerpunkte:

- Bewertung des Potentials für Energieeffizienz durch Einsatz von automatisierten und vernetzten Messtechniken, unter Berücksichtigung drohender Rebound-Effekte und möglicher Akzeptanzhemmnisse.
- Untersuchung des Einflusses von autonomen Fahrzeugen und automatisierten Planungs- und Leitsystemen auf die Struktur und Quantität der Verkehrsnachfrage.
- Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von digitalen Anwendungen; erweiterte Kosten-/Nutzen-Analyse der Digitalisierung in unterschiedlichen Anwendungsfeldern.

### 2.1.3 Elektrifizierung und Sektorkopplung

Der sektorübergreifende Ausbau der erneuerbaren Energien setzt zum einen aus technischen Gründen eine zunehmende Kopplung von einzelnen Energiesektoren voraus („more electric world“). Zum anderen verspricht die Sektorkopplung und Elektrifizierung von Anwendungen, Kosten einzusparen und die Flexibilität des Systems zu erhöhen. Der Einsatz von vernetzten Technologien kann hier u.a. die Übertragung von Preissignalen über Sektorgrenzen hinweg ermöglichen. Erste Ansätze zur Kopplung von Strom- und Verkehrs- bzw. Wärmesektor werden bereits heute verfolgt. Vorhandene Erkenntnisse aus dem Strommarkt zeigen jedoch [20], dass diese Preissignale insbesondere auch physische Engpässe in der Netzinfrastruktur abbilden sollten, um möglichst auch eine physische Markträumung herbeizuführen und damit möglichst systemdienliche Anreize zu setzen. Bei der Ausgestaltung entsprechender regulatorischer Rahmenbedingungen, die zu derartigen sektorübergreifenden Preissignalen führen, besteht noch erheblicher Forschungsbedarf (siehe auch Kapitel 2.6.2 und 2.6.3). Analog dazu sollten auch preisunabhängige Routinen zur Kopplung des Strom-, Wärme- und Verkehrssektors erforscht werden [21]. Die Kopplung der Sektoren im Energiesystem erfordert sowohl adäquate Strategien auf lokaler und systemweiter Ebene als auch sektorale Flexibilisierungsmaßnahmen. Im Bereich des Verkehrssektors ist hier z.B. die Aggregation von elektrifizierten Fahrzeugen zu nennen (vgl. auch Sektorsteckbrief Verkehr).

Zusammenfassend lässt sich der Forschungsbedarf im Bereich der Elektrifizierung und Sektorkopplung wie folgt darstellen:

- Entwicklung von Strategien zur Ausgestaltung von sektorübergreifenden Preissignalen unter Berücksichtigung von Engpässen in der (Netz-)Infrastruktur.
- Entwicklung von Strategien zur Vernetzung von Strom-, Wärme- und Verkehrssektor auf lokaler und systemweiter Ebene.

#### **2.1.4 Versorgungs- bzw. Systemsicherheit**

Die weitreichende Integration von digitalisierten Technologien in alle Energiesektoren und deren verstärkte Kopplung kann, wie oben dargestellt, die Flexibilisierung des Energiesystems erleichtern und somit einen positiven Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten. Im Zuge dessen nimmt jedoch der Grad der Vernetzung innerhalb der systemkritischen Energieversorgungsinfrastruktur erheblich zu. Diese veränderten Abhängigkeiten und Anfälligkeiten erfordern ein neues, erweitertes Verständnis von Versorgungs- und Systemsicherheit sowie eine volkswirtschaftliche Kosten-/Nutzenanalyse von Digitalisierung [16]. Vor diesem Hintergrund sollte zukünftige Energieforschung zum einen ein Verständnis von digitaler Resilienz erarbeiten, welches die Charakteristika eines widerstandsfähigen Energiesystems definiert. Zum anderen gilt es, auch entsprechende Maßnahmen zur Erreichung eines resilienten Systems zu entwickeln.

Cyber-Attacken gelten als eine große Herausforderung zur Erreichung eines widerstandsfähigen Energiesystems [22]. Entsprechend müssen insbesondere Konzepte der Cyber-Sicherheit in die Regulierung von Energiemärkten integriert werden [4]. Die Energieforschung sollte diese Fragen zur Entwicklung von robusten Strategien gegen Cyber-Attacken adressieren. In diesem Zusammenhang sind auch die Anfälligkeit durch einzelne, besonders kritische (IoT-) Technologien, wie z.B. Smart Meter [23], zu untersuchen und diese Erkenntnisse in der Entwicklung von Sicherheitskonzepten zu berücksichtigen [23].

Abschließend ist zu beachten, dass die Anwendung von digitalisierten und vernetzten Technologien notwendigerweise große Mengen an Daten generiert [24]. In diesem Zusammenhang werden Fragen der Definition und Durchsetzung von Eigentumsrechten an Daten, dem Datenschutz sowie der entsprechenden Zuweisung von Nutzungsrechten an den gesammelten Daten aufgeworfen. Diese Fragen gewinnen mit der fortschreitenden Digitalisierung erheblich an Bedeutung. So kann der transparente und diskriminierungsfreie Zugang zu Daten zunehmend zu einem zentralen Faktor für die Wahrung des Wettbewerbs auf Energiemärkten werden. Gleichzeitig stellt die Gestaltung verlässlicher gesetzlicher Standards zum Datenschutz und Schutz der Privatsphäre eine wesentliche Voraussetzung für das notwendige Vertrauen und die Akzeptanz neuer, auf digitalen Technologien basierender Geschäftskonzepte dar [9].

Zusammenfassend teilt sich der Forschungsbedarf im Bereich Versorgungs- und Systemsicherheit in die folgenden Forschungsfragen auf:

- Definition, Entwicklung und Kosten-/Nutzenanalyse von Maßnahmen zu digitaler Resilienz und gegen Cyber-Attacken
- Definition eindeutiger Besitzstrukturen und Nutzungsrechte von Daten aller Marktakteure.

### 2.1.5 BigData im Energiesystem

Die merkliche Verbreiterung der Datenbasis von Markttransaktionen erfordert zum einen die genannten Maßnahmen im Bereich des Datenschutzes (vgl. hierzu Kapitel 2.1.4). Zum anderen bietet die Verfügbarkeit dieser Daten neue Potentiale zur Entwicklung von individualisierten Energiedienstleistungen. So können bestehende Daten zum Verhalten unterschiedlicher Marktakteure zu einer verbesserten Prognose zukünftiger Marktgleichgewichte führen [25]. Dies setzt jedoch ein breites Verständnis der Treiber von Nachfrageänderungen voraus, die entsprechend untersucht werden sollten [26]. Im Sinne des Wettbewerbs auf Energiemärkten ist zudem der diskriminierungsfreie Zugang zu Daten zu gewährleisten, da ansonsten etablierten Unternehmen, die bereits über größere Datensätze verfügen, erhebliche Wettbewerbsvorteile zukommen können.

Darüber hinaus können neue Analysemethoden angewandt werden, um die Prognose meteorologischer Bedingungen, welche Energiemärkte sowohl erzeugungs- als auch nachfrageseitig beeinflussen, zu verbessern [8]. Diesbezüglich sollten im Rahmen der Energieforschung auch Algorithmen zur Prognose der Erzeugung durch Wind- und Solarenergie weiterentwickelt werden. Zudem kann das Wissen um zukünftige meteorologische Bedingungen in Verbindung mit einer breiten Datenbasis zu operativen Daten von Erzeugungsanlagen zu verbesserten Wartungsroutinen führen [27]. Entsprechend sollte die zukünftige Energieforschung auch den Einsatz von BigData-Methoden zur Verbesserung des Betriebs von Erzeugungsanlagen adressieren.

Zusammenfassend zeigen sich im Bereich BigData die folgenden Forschungsschwerpunkte:

- Weiterentwicklung von Methoden zur Prognose der Erzeugung durch Wind- und Solarenergie.
- Entwicklung von Routinen und Algorithmen zur Analyse der Einflussfaktoren von Nachfrageänderungen.

## 2.2 Geschäftsmodelle

Die in Kapitel 1 eingeführten Rahmenbedingungen für die Energiewende bieten ein dynamisches Umfeld für neue Geschäftsmodelle. Neue Chancen und Ansätze lassen sich aus der Dekarbonisierung und dem Bewusstseinswandel und insbesondere aus der Digitalisierung ableiten. Als zentraler Ansatzpunkt bietet sich dabei die mit der Dezentralisierung einhergehende Änderung der Eigentümerstruktur an, die zu einer Auflösung der

Trennung von Energieproduzenten und -verbrauchern führt. In diesem Rahmen ist der Prosumer auch bezeichnend für den Wandel in der Wahrnehmung der Energienutzung hin zu einem High-Involvement-Produkt und den daraus folgenden Geschäftsmodellen im Bereich individualisierter, partizipativer, regionaler und ökologischer Angebote. Die Digitalisierung liefert dazu einerseits die unterstützende Infrastruktur (z.B. Smart Meter) und bietet andererseits originäre Ansatzpunkte für neue Geschäftsfelder.

Für das Gelingen der Energiewende ist eine kosteneffiziente Anpassung an die zunehmend volatile und intermittierende Energieerzeugung unabdingbar. Diese setzt die Entwicklung und Etablierung neuer Geschäftsmodelle voraus, die eine deutliche Steigerung der Flexibilität des Gesamtsystems sowohl auf der Erzeugungsseite als auch auf der Nachfrageseite ermöglichen. Bedeutende Geschäftsfelder erschließen sich in der systemdienlichen Marktintegration von erneuerbaren Energien, der Sektorkopplung, der Generierung und Prozessierung von Preissignalen, der Integration von Kleinspeichern, der Finanzierung von Langzeitspeichern und der Netzreserve, der automatisierten Messung von Energieverbrauch und Emissionen und der damit verbundenen Erhöhung des Potentials von Energieeffizienzmaßnahmen, der Minimierung der räumlichen Distanz zwischen Angebot und Nachfrage und der daraus folgenden Reduzierung des erforderlichen Netzausbaus sowie der Unterstützung der Akzeptanz und der Versorgungssicherheit durch Datenschutz und Resilienz gegen Cyberattacken. Erfolgreiche Geschäftsmodelle stellen dabei einerseits die Voraussetzung für die zügige Weiter- und Neuentwicklung von Technologien und deren möglichst breite Einführung in den Markt dar, andererseits sind erfolgreiche Innovationen die Basis für erfolgreiche Geschäftsmodelle.

Konkret etablieren sich derzeit zahlreiche Kerntechnologien, die die Basis für neue Geschäftsfelder bilden, insbesondere auch im Zuge der Digitalisierung (vgl. Kapitel 2.1). Dazu zählen im Bereich der Energieversorger beispielsweise Smart-Meter und, in Zusammenarbeit mit den Verteilnetzbetreibern, Technologien mit großer Bedeutung für die Sektorkopplung wie das Smart-Grid im Zusammenspiel mit Elektromobilität sowie autonomer oder alternativer Mobilitätskonzepte. Für die Verteilnetzbetreiber sind zusätzlich alle Formen von Speichertechnologien und Eigenversorgungslösungen auf individueller bis regionaler Ebene von höchster Relevanz. Zu den aktuellen Entwicklungen ist im Bereich der Speicher beispielsweise Power-to-X und im Bereich dezentraler Energieversorgung insbesondere die Blockchain-Technologie als Basis für über Mieterstrommodelle hinausgehende Eigenversorgungslösungen zu nennen. Bei den Transportnetzen und im Energiehandel ermöglichen KI (künstliche Intelligenz) und Machine-Learning-Technologien neue Systemdienstleistungen und Flexibilisierungsoptionen, beispielsweise durch kürzere Vorlaufzeiten in einem automatisierten, algorithmenbasierten Energiehandel oder durch Dienstleistungen zur Bildung und Vermarktung von größeren virtuellen Kraftwerken.

### **2.2.1 Forschungsbedarf und Förderformate**

Grundsätzlich besteht aus volkswirtschaftlicher Sicht kein Grund, neue Geschäftsmodelle in jedem Fall mit öffentlichen Mitteln zu „erforschen“. Effiziente Anreize zur Identifikation und Entwicklung neuer, vielversprechender Geschäftsmodelle sollten aus privatwirtschaftlichen Prozessen entstehen, um erfolgreich sein zu können. Forschungsbedarf im Zusammenhang mit Geschäftsmodellen besteht vor allem mit Blick auf die Gestaltung eines förderlichen Marktumfeldes durch geeignete regulatorische Maßnahmen (vgl. auch Kapitel 2.6), mit Blick auf die Ausgestaltung der Forschungsförderung (vgl. die Diskussion im Kapitel 3.1 des Endberichts) sowie bei der Verankerung einer stärkeren Gründerkultur an Forschungseinrichtungen und Hochschulen (vgl. Kapitel 2.2.4 und Kapitel 4.2 des Endberichts).

### **2.2.2 Ausgestaltung geeigneter Rahmenbedingungen für neue, innovative Geschäftsmodelle**

Im Zentrum muss hier die Frage stehen, ob der regulatorische Rahmen die aus System-sicht richtigen und effizienten Signale setzt, damit die privatwirtschaftlichen Akteure auf Anbieter- und Verbraucherseite im Rahmen neuer bzw. weiterentwickelter Geschäftsfelder und unternehmerischer Aktivitäten zum Gelingen der Energiewende beitragen (vgl. Kapitel 2.6). Darüber hinaus kann von staatlicher Seite ein Beitrag für die Entstehung und Weiterentwicklung neuer Geschäftsmodelle über die Bereitstellung von speziellen Informationen über nationale und internationale Rahmen- bzw. Wettbewerbsbedingungen (beispielsweise Preisentwicklungen oder Marktpotentiale) geleistet werden, die für einzelne und vor allem kleinere Teilnehmer im Energiemarkt oft nur schwer und zu hohen Kosten zu beschaffen sind.

Grundlegend sollten bestehende Defizite in der systematischen Analyse der regulatorischen Rahmenbedingungen als Forschungsthema mit Blick auf die neuen Herausforderungen der Energieforschung behoben werden. Zielsetzung hierbei sind wissenschaftlich fundierte Politikempfehlungen für die Ausgestaltung der rechtlichen und regulativen Rahmenbedingungen mit dem Ziel der Generierbarkeit und Umsetzbarkeit neuer Geschäftsmodelle. Insbesondere betrifft dies auch die Rahmenbedingungen zur Verlängerung der Wertschöpfungskette der Energiewirtschaft hin zur Energieeffizienz. Maßgeblich dafür ist ein nachhaltiges Erlösmodell für Energieeffizienz und eine tragfähige Wertschöpfungsarchitektur. Laut Prognosen übersteigen die dadurch entstehenden marktwirtschaftlichen Potentiale die des Verkaufs von Strom (dies ergibt sich aus den im Vergleich zur reinen Energievermarktung höheren potentiellen Umsätzen und Margen, vgl. [28]). In diesem Rahmen sind auch eine Weiterentwicklung des KWKG-Gesetzes zu einem Gesetz für Stromeffizienz (vgl. [28]), die Erarbeitung alternativer Netzentgeltsystematiken wie beispielsweise Smart-Meter gestützte Kapazitätsmodelle für Entnahme und

Einspeisung, sowie die regulatorische Ausgestaltung der Flexibilitätsvermarktung, beispielsweise über geeignete Flexibilitäts-Bonuszahlungen, zu berücksichtigen (vgl. auch Kapitel 2.6).

Darüber hinaus ist die internationale Wettbewerbsfähigkeit unabdingbar für den wirtschaftlichen Erfolg Deutschlands als Industriestandort. Die dafür benötigten nachhaltig niedrigen Energiepreise erfordern eine wettbewerbliche und kosteneffiziente Umsetzung von Flexibilitätsoptionen. Forschung zur Ausgestaltung der Rahmenbedingungen hinsichtlich eines technologieneutralen Wettbewerbs zwischen den verfügbaren Flexibilitätsoptionen ist zum Erhalt von wettbewerbsfähigen Energiekosten maßgeblich (vgl. [29]). Um die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit bestehender industrieller Geschäftsmodelle nicht zu untergraben sollte internationale Klimapolitik darüber hinaus darauf abzielen, das „Level Playing Field“ als zentrales energiepolitisches Ziel zu definieren (vgl. [29]). Forschungsbasierte Evaluierung und Erarbeitung klimapolitischer Instrumente sowie geeigneter Klimapolitikpfade sind dafür unabdingbar und bilden die Grundlage für internationale Klimapolitik. Zusammenfassend sind die folgenden Aspekte bei der Ausgestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen für die Energieforschung zu beachten:

- Bereitstellung spezieller Informationen über nationale und internationale Rahmen- bzw. Wettbewerbsbedingungen.
- Systematische Analyse der Defizite regulatorischer Rahmenbedingungen als Forschungsthema.
- Ausgestaltung geeigneter Rahmenbedingungen zur Verlängerung der Wertschöpfungskette der Energiewirtschaft hin zur Energieeffizienz.
- Weiterentwicklung des KWK-Gesetzes zu einem Gesetz für Stromeffizienz.
- Erarbeitung alternativer Netzentgeltsystematiken.
- Regulatorische Ausgestaltung der Flexibilitätsvermarktung.
- Forschung zur Ausgestaltung der Rahmenbedingungen hinsichtlich eines technologieneutralen Wettbewerbs.
- Forschungsbasierte Evaluierung und Erarbeitung klimapolitischer Instrumente sowie geeigneter Klimapolitikpfade mit der Zielsetzung, das „Level Playing Field“ als zentrales energiepolitisches Ziel für internationale Klimapolitik zu etablieren.

### **2.2.3 Ausgestaltung der Forschungsförderung**

Forschungsbedarf besteht hier einerseits hinsichtlich geeigneter Förderformate, die den Transfer von Innovationen aus der Forschung in die geschäftliche Anwendung erleichtern und andererseits bezüglich der Grundlagen und Rahmenbedingungen energiewirtschaftlicher Betätigung. Ziel ist dabei die Überwindung des „Tals des Todes“ im Übergang von Forschung und Technologieentwicklung in die Marktanwendung. Eine ineffizi-

ente Ausweitung der Forschungsförderung birgt jedoch die Gefahr, sich in den Bereich der Industriesubvention zu bewegen und nicht dem Ziel der volkswirtschaftlich gerechtfertigten Unterstützung der Diffusion neuer Technologien in den Markt zu dienen.

Als grundlegende Entscheidungsbasis ist eine fortwährende „Positiv-Erfassung“, die den Reifegrad der Technologien für die Energiewende sowie die Anwendungsfelder im deutschen Zielmarkt darstellt, anzustreben. Ein solches Monitoring hilft Defizite zu identifizieren und die Ausgestaltung der Forschungsförderung zu lenken. Es besteht auch nach wie vor Forschungsbedarf, inwieweit die Besonderheiten im Energiebereich (beispielsweise hohe Kapitalintensität, Netzwerkeffekte und Pfadabhängigkeiten) den Transfer und die Diffusion von Technologien erschweren und mit welchen besonderen Förderformaten dieser Problematik begegnet werden kann. Ebenso ist eine Weiterentwicklung der Kopplung von Forschungsförderung und Start-up Finanzierung notwendig. Dabei müssen nicht nur mögliche Kopplungspunkte von Forschungs- und Innovationsprozessen an neue Geschäftsmodelle und Start-Ups spezifiziert, sondern auch eine gemeinsame Basis für Sozial- und Ingenieurwissenschaften geschaffen werden. Einen Ansatz dafür bietet beispielsweise die energieforschungsspezifische und forschungsbasierte Ausarbeitung von Konzepten wie dem „Technology Readiness Level“, dem „Solution Readiness Level“ und dem „Integration Readiness Level“ [30].

Die Komplexitätsbeherrschung im modernen Energiegeschäft bedarf einer umfassenden Integration aller relevanten energiewirtschaftlichen Facetten sowie die ganzheitliche Betrachtung der vielfältigen Einflüsse und Anforderungen der normativen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen [31]. Gerade kleinere Marktteilnehmer oder ordnungspolitisch relevante Institutionen können in diesem Umfeld von der Beteiligung an transdisziplinären Forschungsprozessen profitieren und so die sich ergebenden Chancen zukünftiger integrierter Geschäftsmodelle und Smart Markets nutzen. Hilfreich ist dabei eine unterstützende Analyse der Sensitivitäten der Tragfähigkeit oder der Wirtschaftlichkeit von Geschäftsmodellen in Bezug auf Regulierung, aber auch hinsichtlich internationaler Rahmenbedingungen. Des Weiteren ist die Verbreitung und Umsetzung energieeffizienzsteigernder Maßnahmen stark von Informations- und Vertrauensdefiziten gehemmt (vgl. Kapitel 2.4 oder [32]). Energieeffizienz ist erklärungsbedürftig: Der Kunde muss über Kommunikationsmittel überhaupt erst von dem jeweiligen Produkt erfahren. Zudem müssen Produkte zur Steigerung der Energieeffizienz potentiellen Kunden erklärt werden (vgl. [28]). Durch eine forschungsbasierte Ausgestaltung vertrauenswürdiger und leicht zugänglicher Institutionen könnten diese bestehenden Akzeptanzhemmnisse überwunden und neue Marktpotentiale erschlossen werden. Insbesondere müssen die Ursachen für das Vertrauensdefizit gegenüber den bestehenden Beratungsangeboten systematisch ergründet und Lösungsansätze erarbeitet werden (vgl. auch Kapitel 2.4). Um die Förderung von Geschäftsmodellen in den Förderformaten der Energie-

forschung zu verankern sollten insbesondere die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- Fortwährende „Positiv-Erfassung“ des Reifegrads und der Anwendungsfelder der Technologien.
- Erforschung der Besonderheiten, die im Energiebereich den Transfer und die Diffusion von Technologien erschweren.
- Weiterentwicklung der Kopplung von Forschungsförderung und Start-up Finanzierung.
- Schaffung einer gemeinsamen Kategorisierung des Forschungsfortschritts für Sozial- und Ingenieurwissenschaften.
- Förderung der Beteiligung kleinerer Marktteilnehmer oder ordnungspolitisch relevanter Institutionen an transdisziplinären Forschungsprozessen.
- Analyse der Sensitivität der Tragfähigkeit bzw. Wirtschaftlichkeit von Geschäftsmodellen in Bezug auf Regulierung, aber auch hinsichtlich internationaler Rahmenbedingungen.
- Erforschung der Verbreitungs- und Umsetzungshemmnisse energieeffizienzsteigernder Maßnahmen und forschungsbasierte Ausgestaltung vertrauenswürdiger und leicht zugänglicher Institutionen zur Überwindung bestehender Akzeptanzhemmnisse und Erschließung neuer Marktpotentiale.

#### **2.2.4 Förderung einer Gründerkultur an Forschungseinrichtungen und Hochschulen**

Die mangelnde Umsetzung von Forschungsergebnissen in erfolgreiche Unternehmensgründungen ist nicht nur in der mangelnden Berücksichtigung der unternehmerischen Perspektive in jeder Stufe des Forschungsprozesses begründet. Wesentliche Hemmnisse sind vielmehr auch auf die bestehende Distanz zwischen Forschung und einer gelebten Gründerkultur zurückzuführen, die bis hin zu einem tiefem Misstrauen gegenüber den Unsicherheiten reicht, die ein Start-Up-Prozess unumgänglich mit sich bringt. Neue Förderformate sollten die parallele Entwicklung von Geschäftsmodellen in der Technologieentwicklung stärker und direkter berücksichtigen und auf eine langfristige und tiefgehende Etablierung einer Gründerkultur in der Forschungslandschaft abzielen, bei der Versagen und Scheitern als natürlicher Teil derartiger Prozesse wahrgenommen werden.

Einen detaillierten Einblick in die Rahmenbedingungen und Hemmnisse bieten die HLL-Studie zur Analyse des Gründungsgeschehens in Deutschland in [33] sowie der GEM Global Report, ein internationaler Vergleich der Gründungskultur in verschiedenen Ländern in [34]. In der HLL-Studie nennen die befragten Experten als größtes Hindernis für Unternehmensgründungen die mangelnde Fehler-Kultur und eine gesellschaftliche Be-

wertung des Scheiterns, die keinen Freiraum für neue Ideen und Gründungen zulässt. Des Weiteren wird unternehmerischer Wagemut gesellschaftlich nicht positiv beurteilt, sondern kritisch beäugt. Bei den Handlungsempfehlungen wird die Rolle von Clustern hervorgehoben. Neben der räumlichen Konzentration kooperierender Betriebe beinhalten diese Bildungsprogramme zur Unternehmensgründung, MINT Ausbildung an Universitäten und Forschungseinrichtungen, Seed-Finanzierungen und Förderprogramme für regionale Innovationsinitiativen und Konsortialprojekte zwischen Start-Ups, Forschungseinrichtungen und KMUs in clusternahen Themenbereichen. Der Bericht gibt dabei auch explizite Empfehlungen für die inhaltliche Ausgestaltung der Bildungsprogramme zur Unternehmensgründung. Als wichtigste Einzelmaßnahmen zur Steigerung der Unternehmensgründungen werden die Erhöhung interdisziplinärer Studienangebote und innovationsorientiertere Hochschulen genannt.

Weiterhin wird in der HLL-Studie eine Reduzierung des bürokratischen Verwaltungsaufwands für Gründungen gefordert, der in Deutschland (10,5 Tage) wesentlich höher als in Ländern wie Kanada (1,5 Tage), Frankreich (4,0 Tage) oder Großbritannien (4,5 Tage) liegt. Dennoch ist laut GEM Global Report die Situation bezüglich der bürokratischen Hürden im internationalen Vergleich noch gut. Dieser attestiert Deutschland im europäischen Umfeld ebenso überdurchschnittliche Werte bei Finanzierungsmöglichkeiten, staatlicher Unterstützung, Steuern, Auflagen, Regulierungen, Technologietransfer sowie bei physischer, institutioneller und Markt-Infrastruktur. Klar unterdurchschnittliche Bedingungen liegen lediglich bei der unternehmerischen Ausbildung im schulischen sowie universitären Bereich, bei der Binnenmarktdynamik und bei den kulturellen und sozialen Normen bezüglich Unternehmensgründungen vor. So sieht das GESI Ranking des GEM Reports den deutschen Unternehmergeist nur auf Platz 37 von 54 betrachteten Ländern oder auf Platz 15 von 24 unter den entwickelten, innovationsgetriebenen Nationen. Insbesondere bei den für Start-Ups relevanten „Early-Stage Entrepreneurial Activities“ liegt Deutschland in den Erhebungen der letzten drei Jahre zwischen dem vorletzten und sechstletzten Platz, wobei der Anteil der weiblichen Gründer in dieser Phase nur auf Platz 40 von 54 im internationalen Vergleich liegt. Als besonders problematisch wird auch hier die gesellschaftliche Einstellung gegenüber unternehmerischer Tätigkeit bewertet. In Deutschland liegt die Einstufung von Unternehmensgründungen als gute Karriere-Wahl nur auf Platz 45 und die mediale Darstellung des Unternehmertums auf Platz 41 von 52. Unterboten wird dies lediglich von der unternehmerischen Selbsteinschätzung der Deutschen, welche sich mit ihren selbst wahrgenommen unternehmerischen Fähigkeiten auf Platz 47 und ihrem selbst bezifferten Unternehmergeist auf Platz 49 von 54 des internationalen Rankings platzieren.

Die Berücksichtigung der Förderung der Gründertätigkeit als Ziel der Forschungsförderung in der Energieforschung stellt sich als komplexe Aufgabe dar. Es hat sich gezeigt, dass das Imitieren erfolgreicher Institutionen und Prozesse des nordamerikanischen

Raums nicht die gewünschten Erfolge gebracht hat. Vielmehr können diese Institutionen ihre Potentiale nur entfalten, wenn sie auch auf ein entsprechendes soziales und kulturelles Umfeld treffen. Der notwendige kulturelle Wandel ist ein sehr langwieriger Prozess, für den sich jedoch gerade im Rahmen der Forschungsförderung ein idealer Ansatzpunkt findet. Dafür sollten die entsprechenden Förderformate die folgenden Bereiche berücksichtigen:

- Monitoring der Aktivitäten.
- Bereitstellung zentraler Ressourcen und Kompetenzen.
- Mentoring einschließlich Schulungen, Kapazitätsaufbau und des Einforderns von Leistungen.
- Langfristiger Bewusstseinsaufbau und Förderung einer Gründerkultur.
- Kontinuierliche Evaluation der Maßnahmen.
- Begleitung vielversprechender Projekte über Förderzeitraum hinaus.
- Vernetzung, Synergien, Cluster.
- Reduzierung der bürokratischen Hürden.
- Originäre Forschung zu Möglichkeiten zur Steigerung der Gründungstätigkeit.
- Parallel zu Forschungsausschreibungen auch Ausschreibung fördernder und integrativer Prozesse.

### **2.3 Akzeptanz**

Die Dekarbonisierung des Energiesystems wirft auf verschiedenen Ebenen Fragen der Akzeptanz auf. Zumindest vorübergehend ergeben sich aus dem Umbau des Versorgungssystems Kosten, die von privaten und gewerblichen Verbraucher heute getragen werden müssen, auch wenn sie nicht immer direkt von den erhofften (zukünftigen) Vorteilen des neuen Versorgungssystems profitieren werden. Der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien und der Netzinfrastruktur bedeutet daneben eine Veränderung von Landschaftsbildern und natürlicher Umgebung, die von der Bevölkerung zumindest hingenommen werden muss. Die Akzeptanz der Energiewende insgesamt, aber auch einzelner Energieprojekte vor Ort, steht dabei in einem besonderen Spannungsfeld gegenläufiger Entwicklungen: Die mit dem Umstieg auf erneuerbare Energien angelegte Entwicklung hin zu dezentraleren Strukturen vergrößert einerseits den Kreis der unmittelbar durch Landschaftsveränderungen o.Ä. Betroffenen (vgl. etwa [35]). Demgegenüber stehen andererseits das gestiegene Bewusstsein und der gestiegene Wille vieler Verbraucher zur Beteiligung und Gestaltung der Energiewende, denen die Entwicklung dezentraler Versorgungsstrukturen zunächst entgegenzukommen scheint (vgl. Kapitel 1). Akzeptanzfragen stellen sich schließlich auch bei der Marktdiffusion von Innovationen. Technische Lösungen können nur insoweit einen Beitrag zur Energiewende leisten, als Haushalte und Unternehmen bereit sind, in diese zu investieren und diese anzuwenden,

selbst wenn damit Änderungen in Nutzungsgewohnheiten verbunden sein sollten. Akzeptanz bzw. die Unterstützung von Akzeptanz kann daher auch einen wichtigen Treiber für die weitere technische Entwicklung darstellen, wenn durch technische Lösungen beispielsweise negative externe Effekte erneuerbarer Energien reduziert werden können. In diese Richtung zeigt etwa auch der Forschungsbedarf, der im Sektorsteckbrief „Energiewandlung“ für die Windenergie ausgewiesen wird (vgl. Leistungssteigerung und Lärmreduktion durch Verbesserung der Aerodynamik von Rotorblättern sowie Entwicklung von „smart blades“).

Derartige Fragen der Akzeptanz wurden in den letzten Jahren bereits vielfach diskutiert und erfuhren, etwa im Zusammenhang mit dem Netzausbau und anderen Infrastrukturprojekten in Deutschland, große öffentliche Aufmerksamkeit. Trotzdem bleibt der Akzeptanzbegriff selbst bislang eher unscharf [36]. Akzeptanz stellt, im Gegensatz zur Akzeptierbarkeit, eine primär subjektive Größe dar, für die objektive bzw. rationale Überlegungen wie Expertenurteile nur von eingeschränkter Bedeutung sind [37]. Der einleitende Überblick zeigt neben der Bedeutung von Akzeptanzfragen generell auch die Breite des Akzeptanzbegriffs auf: Akzeptanz umfasst grundsätzlich sowohl passive wie aktive Formen der Zustimmung oder Unterstützung zu/von einzelnen Technologien, Projekten, einzelnen energiepolitischen Maßnahmen oder auch dem mit der Energieverwende verfolgten Pfad der Dekarbonisierung des Energiesystems insgesamt. Fragen der Akzeptanz stellen sich entsprechend auf sehr unterschiedlichen gesellschaftlichen Ebenen sowie in Bezug zu unterschiedlichen Objekten [36]. Die bekannte und praktikable Systematisierung des Akzeptanzbegriffs nach Wüstenhagen et al. (2007) [35] unterscheidet nach den Akzeptanzsubjekten zwischen der gesellschaftlich, sozio-politischen Akzeptanz von Technologien, politischen Maßnahmen oder des Transformationspfads insgesamt, der lokalen Akzeptanz von Projekten durch Bürger und Behörden vor Ort und der Marktakzeptanz von Technologien und Dienstleistungen auf Ebene der Verbraucher und Investoren. Alle diese Ebenen von Akzeptanz sind bei der Energiewende betroffen bzw. relevant, wie nicht zuletzt aus der Einführung des Kapitels deutlich wird (zur Relevanz von Akzeptanz auch [38]).

### **2.3.1 Sozio-politische und lokale Akzeptanz**

Auf Ebene der sozio-politischen Akzeptanz erfährt der Umbau des Versorgungssystems derzeit eine unverändert hohe Zustimmung und Unterstützung. Eine Diskrepanz scheint aber zwischen der grundsätzlich positiven Einstellung der Bevölkerung gegenüber den energiepolitischen Zielen einerseits und der Einschätzung ihrer Realisierbarkeit andererseits zu bestehen [39]. Zum Teil zeigen sich auch deutliche Unterschiede in der Beurteilung einzelner Technologien (z.B. [40], [37], [36]). Diese Unterschiede zu identifizieren und ihre Ursachen zu verstehen ist angesichts verschiedener denkbarer „Energiezukünfte“ von zentraler Bedeutung für die weitere konkrete Umsetzung der klima- und energie-

politischen Ziele (z.B. [41] zur Frage des präferierten Energiemix in Dänemark). Zu beachten ist dabei auch, dass Akzeptanz keine statische Größe darstellt, sondern sich im Zeitverlauf verändern kann. Neben einem tieferen Verständnis der Faktoren von Akzeptanz und möglicher Unterschiede erscheint daher eine fortwährende Analyse der Entwicklung über die Zeit angemessen/notwendig.

Bislang erscheint auch in vielen Fällen noch unklar, inwieweit sich eine grundsätzlich positive Einstellung gegenüber der Energiewende in zusätzliche Zahlungsbereitschaft der Verbraucher übersetzt und wie belastbar diese im Zeitverlauf tatsächlich ist (vgl. etwa [40]). Trotz hoher oder sogar eher steigender Zustimmung zur Förderung erneuerbarer Energien identifizieren etwa Andor et al. (2016) [42] einen Rückgang in der Zahlungsbereitschaft der Verbraucher für „grünen“, d.h. klimafreundlich erzeugten, Strom in den letzten Jahren. Die Autoren weisen aber auch darauf hin, dass weiter zunehmende finanzielle Belastungen für die Verbraucher durch die Energiewende auch die Akzeptanz der Energiewende insgesamt gefährden können.

Im Zusammenhang mit den finanziellen Belastungen und auch sonstigen Lasten der Energiewende stellt zudem sowohl auf gesellschaftlicher als auch lokaler Ebene eine als „fair“ empfundene Verteilung von Lasten und Kosten eine wichtige Voraussetzung für die Akzeptanz des Energiesystemumbaus dar [36]. Fragen der Akzeptanz sind damit auch bei der Ausgestaltung von Förderinstrumenten und regulatorischem Rahmen zu beachten (vgl. Kapitel 2.6). Beispielsweise werden die Regelungen zur anteiligen Beteiligung von energieintensiven Unternehmen oder Eigenversorgern von einer Mehrheit der Gesellschaft als ungerecht empfunden. Ebenso wird, zumindest unter Sicherheit über die zukünftigen Kostenbelastungen, derzeit eine solidarischere Verteilung der Förderkosten für erneuerbare Energien befürwortet [43].

Mit fortschreitendem Umbau des Versorgungssystems sollte darüber hinaus der Fokus der Akzeptanzforschung erweitert werden. Während bislang insbesondere erneuerbare Energietechnologien wie Wind- und Sonnenenergie Gegenstand der Forschung waren, sollten zukünftig etwa auch (Groß-)Energiespeicher und die Energieinfrastruktur insgesamt stärker betrachtet werden. Trotz ihrer zentralen Rolle für die Energiewende liegen gerade bei den Speichertechnologien bislang wenige Erkenntnisse zur Akzeptanz vor (z.B. [44], [45]). Deutliche Akzeptanzprobleme konnten beispielsweise bei Power-to-Gas-Anlagen beobachtet werden, deren Hintergründe mit Informationsdefiziten zusammenhängen können, insgesamt bislang jedoch weitgehend ungeklärt sind [37].

Akzeptanzprobleme zeigen sich bislang überwiegend auf lokaler Ebene in der konkreten Umsetzung von Energieprojekten (vgl. etwa [37], [46], [36], [47]). Hier liegt bislang auch der Schwerpunkt der Akzeptanzforschung (z.B. [48]). Vielfach lässt sich die Betroffenheit auf lokaler Ebene aber nicht reduzieren bzw. umgehen. Wichtig für die erfolgreiche Umsetzung von Energieprojekten ist jedoch nicht die aktive Unterstützung, sondern vor

allein die Tolerierung der Veränderungen durch die Betroffenen. Wie bislang sollten daher die Voraussetzungen für Akzeptanz und die Gestaltung von Ansätzen diese zu schaffen im Fokus der Forschung stehen (z.B. [49]). Dem gestiegenen Bewusstsein und Gestaltungswillen der Bürger in Bezug auf das Thema Energie (vgl. Kapitel 1) ist in jedem Fall über Informations- und Kommunikationsangebote, insbesondere aber über Möglichkeiten der Beteiligung Rechnung zu tragen. Die Akzeptanz nimmt grundsätzlich zu, je größer die Einsicht über die Notwendigkeit von Maßnahmen ist, je höher der (relative) Nutzen einer Maßnahme eingeschätzt wird, je stärker das Gefühl der Gestaltbarkeit und Selbstwirksamkeit des Einzelnen erhalten wird und je stärker sich Betroffene mit der Maßnahme identifizieren können. Diese Aspekte sind bei der Gestaltung von Informations- und Kommunikationsangeboten zu beachten, die allerdings gegenüber Formen der direkten Beteiligung weniger geeignet sind, Akzeptanz zu schaffen. Eine finanzielle/wirtschaftliche Beteiligung erscheint hilfreich, doch kann einer entsprechenden offenen und diskursiven Gestaltung der Planungs- und Entscheidungsprozesse im Vorfeld eine sogar höhere Bedeutung zukommen ([3], [50]). Insbesondere bei der Ausgestaltung derartiger, möglichst wirksamer Beteiligungsverfahren ist Forschungsbedarf zu sehen ([3], [51]). Herausforderungen stellen in diesem Zusammenhang etwa die Abwägung zwischen dem Einbezug der Interessen von Bürgern, Verwaltung und Unternehmen und der Dauer der Entscheidungsprozesse dar sowie die Abstimmung verschiedener Entscheidungsprojekte angesichts der systemischen Zusammenhänge von Energieprojekten und der zunehmenden Dezentralisierung der Versorgungsstrukturen.

Neben der Analyse der Voraussetzungen von und Möglichkeiten zur Schaffung von Akzeptanz etwa über die Gestaltung geeigneter Beteiligungsmöglichkeiten oder auch die Reduktion externer Umwelteinflüsse erneuerbarer Energien ist die geeignete Integration dieser im Wesentlichen sozialwissenschaftlichen Forschungsergebnisse in die Energiesystemanalyse bislang noch weitgehend ungelöst (vgl. etwa [52]). Für ein genaueres Verständnis der zukünftigen „Flaschenhälse“ der Energiewende erscheint daher eine methodische Weiterentwicklung der Systemanalyse sinnvoll und notwendig, nicht nur mit Blick auf Aspekte von (sozialer und politischer) Akzeptanz sondern generell mit Blick auf eine stärkere Berücksichtigung sozialer (sozio-kultureller) Rahmenbedingungen und deren möglichen Veränderung über die Zeit (vgl. auch Kapitel 2.5.4).

Zusammenfassend ergeben sich aus dieser Diskussion die folgenden Schwerpunkte in der Energieforschung:

- Analyse der Voraussetzungen und Treiber von Akzeptanz auf gesellschaftlicher, lokaler Ebene sowie ihrer Veränderung über die Zeit.
- Analyse des Zusammenhangs zwischen Akzeptanz und Zahlungsbereitschaften.
- Erweiterung des Fokus der Akzeptanzforschung.
- Analyse und zukünftige Gestaltung wirksamer Beteiligungsverfahren.

- Methodische Fortentwicklung der Energiesystemanalyse zur stärkeren Berücksichtigung von Fragen der Akzeptanz.

### 2.3.2 Marktakzeptanz

In einem erweiterten Verständnis von Akzeptanz fällt schließlich auch die Marktdiffusion innovativer Energietechnologien und -dienstleistungen unter den Akzeptanzbegriff. Die Bedeutung dieser in der Klassifizierung von Wüstenhagen et al. (2007) [35] als Marktakzeptanz bezeichneten Ausprägung von Akzeptanz für das Gelingen der Energiewende ist angesichts des angestrebten, tiefgehenden Umbaus des Versorgungssystems offensichtlich. Die technologischen Herausforderungen bei der Dekarbonisierung des Energiesystems sind nur zu bewältigen, wenn technische Lösungen nicht nur entwickelt werden, sondern verbreitet Anwendung finden. Zugleich gilt die Marktakzeptanz aber als die bislang am wenigsten in der (Akzeptanz-)Forschung betrachtete Akzeptanzebene [48].

Fragen der Diffusion innovativer Technologien und Dienstleistungen stellen sich grundsätzlich sowohl auf der Seite der Energiebereitstellung als auch auf Seite der Energienachfrage und sowohl im Unternehmensbereich als auch im Bereich privater Haushalte. Sie sind von besonderer Relevanz in den Fällen, in denen innovative Technologien und Dienstleistungen nicht nur Investitionskosten im engeren Sinn aufwerfen, sondern etwa Anpassungen von Verhaltens- oder Nutzungsgewohnheiten erfordern oder sich in sonstigen Merkmalen/Qualitäten von bisherigen Technologien und Dienstleistungen unterscheiden. Eine besondere Herausforderung sind die vielfach grundlegenden Informations- und Bewusstseinsdefizite von privaten Verbrauchern und Unternehmen über die Funktionsweise des Energieversorgungssystems allgemein, über die Implikationen des Ausbaus erneuerbarer Energien und im Zuge dessen die Möglichkeit, durch neue Speicher- und Erzeugungslösungen sowie durch Steigerung der Energieeffizienz oder Nachfrageflexibilität zur Dekarbonisierung des Energiesystems beitragen zu können.

Im nachfolgenden Kapitel 2.4 werden Fragen der Marktakzeptanz und damit zusammenhängender Forschungsbedarf mit einem Fokus auf das Energienachfrageverhalten aufgegriffen. Allgemein begründet das Thema Marktakzeptanz über die reine technische Problemlösung hinausgehende (sozialwissenschaftliche) Forschungsfragen, denen generell in Zukunft noch stärkere Aufmerksamkeit parallel zur Technologieentwicklung gewidmet werden sollte. Diese reichen etwa von den Voraussetzungen für eine hohe Investitionsbereitschaft in den Ausbau dezentraler erneuerbarer Energieressourcen (oder auch von Energiespeicherlösungen, vgl. etwa [53]), über mögliche organisatorische Gründe für die Nichtbeachtung von klimafreundlichen Investitionsoptionen in Unternehmen, bis hin zur Frage der Finanzierung von Energieinnovationen am Markt (zur Finanzierung, vgl. etwa [54]). Mögliche Probleme der Marktakzeptanz sollten in Zukunft frühzeitiger bei der Technologieentwicklung identifiziert und mitgedacht werden, um unter

Umständen die technologische Entwicklung anpassen zu können und/oder zielgerichteter regulatorische Rahmenbedingungen im Voraus entwickeln zu können. Forschung zur Marktakzeptanz kann so auch einen wichtigen Beitrag zur Heranführung von Technologien hin zur Marktreife, d.h. zur Überwindung des „Tal des Todes“, und zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle bzw. entsprechend regulatorischer Rahmenbedingungen leisten.

## **2.4 Energienachfragverhalten (Nicht-technische Hemmnisse)**

Die Energienachfrage bzw. das Verbrauchsverhalten insgesamt gilt als ein zentraler Hebel für die Dekarbonisierung des Energiesystems (vgl. die Sektorsteckbriefe zu den Anwendungssektoren oder etwa [55], [56]) und die Lösung verschiedener Zielkonflikte zwischen Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit, Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit und (gesellschaftlicher wie lokaler) Akzeptanz. Diese Erwartungen knüpfen sich an die mögliche Senkung des Energiebedarfs über die Steigerung der Energieeffizienz und/oder von Umweltbewusstsein getriebenen Verhaltensänderungen der Verbraucher (Suffizienz) und die (zeitliche und u.U. auch räumliche, vgl. Kapitel 2.1 und 2.5.1) Flexibilisierung der Energienachfrage. Die Senkung des Energieverbrauchs/-bedarfs verspricht geringere Umweltbelastungen durch ein insgesamt kleiner dimensioniertes Energieversorgungssystem und kann auf diese Weise zur (sozialen und lokalen) Akzeptanz beitragen. Sie gilt darüber hinaus in vielen Fällen als kostengünstige bzw. -effiziente Vermeidungsoption, über die einerseits das Ziel der Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit erreicht werden kann und andererseits Verteilungs- und in der Folge Akzeptanzprobleme steigender Energiepreise abgemildert werden können (vgl. auch [57], [58]). Ähnliches gilt auch für die (kurzfristige) Flexibilisierung der Energienachfrage. Über die gezielte Verlagerung von Nachfrage in die Zeiten hoher Überschüsse erneuerbarer Energie (Demand Response) kann grundsätzlich dem steigenden Flexibilitätsbedarf im zukünftigen Energieversorgungssystem in kosteneffizienterer Weise Rechnung getragen werden, als wenn die notwendige Flexibilität allein über die Angebotsseite und/oder den Ausbau der Netzinfrastruktur bereitgestellt werden muss (s. auch Kapitel 2.5).

Gegenwärtig reagiert die Energienachfrage aber nicht nur in Deutschland sowohl im privaten als auch im gewerblichen und industriellen Bereich kurzfristig und auch langfristig nur relativ schwach auf (steigende) Energiepreise (z.B. [59], [58], [60]). Die Gründe hierfür liegen, auch wenn in einzelnen Sektoren durchaus noch große technische Herausforderungen bei der Steigerung der Energieeffizienz und/oder der kurzfristigen Flexibilität der Energienachfrage bestehen können (vgl. Sektorsteckbriefe Industrie, GHD, private Haushalte), in vielen Fällen auch bei nicht-technischen Hemmnissen bei Anwendung entsprechender Technologien und Änderung von Verbrauchsgewohnheiten.

Hemmnisse wie fehlende wirtschaftliche Anreize, Informationsprobleme oder besondere Verhaltensmuster der Verbraucher stehen dabei vielfach direkt im Zusammenhang mit den bislang charakteristischen Merkmalen des Energieverbrauchs: Abgesehen von wenigen Großverbrauchern besteht in der Regel keine Möglichkeit, den Energieverbrauch einzelner Anwendungen und/oder die Echtzeitkosten des Energieverbrauchs unmittelbar zu beobachten. Schon deshalb nehmen Verbraucher die Energieversorgung meist nicht als Gut mit zeitvariablen Preisen wahr, sondern eher als dauerhafte Dienstleistung (z.B. [61]). Zugleich sind Änderungen des Verbrauchsverhaltens oft nicht durch eine einzelne Entscheidung oder Maßnahme herbeizuführen, sondern erfordern das konsistente Zusammenspiel mehrerer Maßnahmen und (Unter-)Entscheidungen, das Verbraucher oft nur schwer überblicken (vgl. [62], [56]). Nicht-technische Hemmnisse ergeben sich darüber hinaus aus verfestigten Verhaltens- und Nutzungsgewohnheiten. Zur Bereitschaft diese aufzugeben oder zu überdenken bedarf es in der Regel neben starken wirtschaftlichen Anreizen der Einsicht in die Bedeutung bzw. Notwendigkeit der Verhaltensänderung, einer Kompatibilität der Verhaltensänderung zum sonstigen Umfeld bzw. Alltag oder ihre Einfachheit sowie das Gefühl von Freiwilligkeit bzw. Entscheidungsautonomie (Selbstwirksamkeit) zur Vermeidung sogenannter psychologischer Reaktanz (für einen Überblick vgl. [3], [63]).

#### **2.4.1 Energieeffizienz (und Suffizienz)**

Nicht-technische Hemmnisse zeigen sich regelmäßig bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Trotz verschiedener (Förder-)Programme drohen die Effizienzfortschritte in Deutschland hinter den im Rahmen der Energiewende gesteckten Zielen zurückzubleiben [9]. Größerer Nachholbedarf besteht beispielsweise im Gebäudebereich, in dem sich trotz Einführung von Energieausweis, zahlreicher sonstiger Informationsangebote, Setzen von Standards (EnEV) und Förderung von Sanierungen über zinsvergünstigte Kredite die Quote energetischer Sanierungen in Deutschland bislang nicht signifikant erhöht hat (z.B. [64], [65]). Gleichzeitig gelten viele der identifizierten Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz nicht nur aus gesamtwirtschaftlicher bzw. sozialer Sicht, sondern sogar privatwirtschaftlich als sinnvoll (vgl. auch Sektorsteckbrief „Private Haushalte“).

Im Wesentlichen gibt es zwei Erklärungsansätze zu dieser sogenannten Energieeffizienz-Lücke (bzw. „Energie-Paradox“). Es können zum einen über Umweltschäden oder sonstige externe Kosten des Energieverbrauchs hinausgehende Gründe des Marktversagens vorliegen, die verhindern, dass sogar wirtschaftlich vorteilhafte Investitionen in höhere Energieeffizienz getätigt werden. Derartige Gründe des Marktversagens stellen beispielsweise Informationsdefizite der Verbraucher über die technischen Möglichkeiten, Informationsasymmetrien und geteilte Anreize (Prinzipal-Agenten-Probleme) etwa im Verhältnis von Mietern zu Vermietern, oder Liquiditätsbeschränkungen bei der Finanzie-

zung von Effizienzmaßnahmen am Kapitalmarkt dar. Zum anderen erfahren mögliche verhaltens-ökonomische Besonderheiten beim Energieverbrauchsverhalten zunehmend Beachtung, nicht zuletzt da derartige Abweichungen von der Annahme rein rationaler Energieverbraucher durch die grundlegenden Charakteristika von Energieverbrauch (vgl. oben) und Effizienzinvestitionen – relativ hohe Investitionskosten stehen längerfristigen, unsicheren Erträgen gegenüber – begünstigt werden ([66], [56]). Derartige Abweichungen von der Annahme rationaler Entscheidungsfindungen ergeben sich etwa durch Anwendung vereinfachender Entscheidungs-Heuristiken in Folge kognitiver Beschränkungen, einer besonderen Aversion gegenüber bzw. Gewichtung von Verlusten, zu kurzfristigen Entscheidungshorizonten, der Wahl des Status quo als Referenzpunkt zur Bewertung von Effizienzmaßnahmen, oder schlicht aus mangelndem Bewusstsein für den Energieverbrauch (für einen aktuellen Überblick über die Literatur zur Energieeffizienz-Lücke vgl. [67], [68], [69]).

Die Kombination aus weitreichenden Informationsproblemen und verhaltens-ökonomischen Besonderheiten des Energieverbrauchsverhaltens gilt darüber hinaus als Ursache dafür, dass auch reine Verhaltensänderungen hin zu einem energiesparenderen Lebensstil unterbleiben (Suffizienz), trotz steigender Energiepreise und grundsätzlich bestehender wirtschaftlicher Anreize (vgl. [56]).

Trotz umfangreicher Literatur besteht erheblicher weiterer Forschungsbedarf. Generell erscheint ein genaueres Verständnis und die Überprüfung der empirischen Relevanz der verschiedenen, nicht-technischen Hemmnisse bei der angestrebten Reduktion des Energieverbrauchs notwendig. Insbesondere gilt dies hinsichtlich der empirischen Relevanz der verhaltens-ökonomischen Besonderheiten und ihrer Abgrenzung zu reinen Informationsdefiziten (vgl. [67], [66]). Nur auf dieser Grundlage ist eine zielgerichtete, d.h. effektive und effiziente, Gestaltung energiepolitischer Instrumente und Rahmenbedingungen zur Steigerung der Energieeffizienz möglich. Weiterer Forschungsbedarf besteht auch bei der genaueren Bestimmung der gesamt- wie privatwirtschaftlich sinnvollen und nicht nur theoretischen sondern auch realisierbaren Effizienz- und Reduktionspotentiale [67]. Bestehende Potentialschätzungen und Instrumente zur Steigerung der Energieeffizienz sollten kritisch evaluiert werden. Gerade bei letzterem sollten dabei auch mögliche Interaktionen zwischen verschiedenen Ansätzen – so können positive Erfahrungen Dritter nach erfolgreicher Förderung der Marktverbreitung in einer frühen Phase die Marktakzeptanz erhöhen – und Zusammenhänge mit sonstigen umwelt- oder klimapolitischen Instrumenten (wie bspw. dem EU ETS) analysiert und berücksichtigt werden (z.B. im Zusammenhang mit der Verbreitung von Elektrofahrzeugen: [63], [70], [71], [72]).

Sowohl bei der Ermittlung der Effizienzpotentiale als auch bei der Gestaltung und Evaluation von Instrumenten (z.B. mit Blick auf Subventionen zum Schließen der Energieeffizienzlücke: [73]) wird zudem die Heterogenität der Verbraucher zu wenig berücksich-

tigt. Die (wirtschaftlichen) Vor- und Nachteile von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sowie von Verhaltensänderungen unterscheiden sich zwischen verschiedenen Verbrauchern ebenso wie die (finanziellen) Voraussetzungen zur Planung und Durchführung von Effizienzmaßnahmen ([68], [67]). Dies gilt etwa auch für die Wahl der Diskontraten zur Bewertung zukünftiger Energiekosteneinsparungen gegenüber gegenwärtigen Investitionskosten ([74], [75]). Die Heterogenität der Verbraucher ist zudem auch mit Blick auf verteilungspolitische Implikationen von Maßnahmen (insbesondere prezialen Instrumenten) zur Reduktion des Energieverbrauchs von Bedeutung. So kann etwa eine Steigerung der Sanierungsrate im Gebäudebereich starke Verteilungsimplicationen haben, die die Akzeptanz der Energiewende gefährden und ausgleichende Maßnahmen erfordern können [9].

Forschungsbedarf besteht auch mit Blick auf mögliche sonstige Hemmnisse bzw. (nicht-monetäre) Kosten von Effizienzmaßnahmen aus Verbrauchersicht. Dazu zählen zum einen hohe Informations- und Transaktionskosten im Vorfeld oder während der Durchführung von Effizienzinvestitionen (etwa [76]). Zum anderen ergeben sich Hemmnisse und zusätzliche Kosten sobald energieeffizientere Produkte oder Anwendungen keine perfekten Substitute aus Verbrauchersicht darstellen. Ein genaueres Verständnis dieser Probleme der Marktakzeptanz fehlt bislang vielfach. Gründe können in u.U. nicht beobachteten oder berücksichtigten Abweichungen bzw. Einschränkungen sonstiger Merkmale liegen [67], wie etwa eine veränderte Lichtfarbe energieeffizienter gegenüber konventionellen Leuchtmitteln oder die als eingeschränkt wahrgenommenen Nutzungsmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Antrieben (vgl. auch Sektorsteckbrief Verkehr).

Wesentlich stärker als bislang sollte bei der Bestimmung der Effizienz- und Reduktionspotentiale auch berücksichtigt werden, ob und inwieweit diese vom Alltagsverhalten der Verbraucher und u.U. Verhaltensänderungen abhängen [63], die in der Realität nicht notwendigerweise akzeptiert und/oder nur teilweise umgesetzt werden. So nützen etwa aufwendige energetische Sanierungen im Gebäudebereich wenig, wenn die Bewohner nicht auf langes Lüften verzichten wollen [9].<sup>1</sup> Mit Blick auf die Realisierbarkeit von Effizienzpotentialen sollten zudem drohende Rebound-Effekte noch stärker berücksichtigt und analysiert werden, d.h. durch Effizienzverbesserungen selbst induzierte Verhaltensänderungen, die dem Ziel der Energieverbrauchsreduktion entgegenlaufen. Auch wenn diese Verhaltenspassungen in der Regel Effizienzgewinne nicht überkompensieren,

---

<sup>1</sup> Ebenso werden im Gebäudebereich Effizienzpotentiale vielfach überschätzt, da statt Voll- in der Praxis oft nur Teilsanierungen durchgeführt werden (vgl. [77]).

können sie doch zu einer erheblichen Abweichung von den technischen Effizienzpotentialen in der Realität führen (vgl. auch für einen Überblick: [78], [3]).<sup>2</sup>

Die Bestimmung der Effizienzpotentiale sollte dabei generell, wie etwa bei der Bewertung von Effizienzpotentialen im Gebäudebereich, stärker unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Maßnahmen erfolgen [9]. Angesichts des besonderen Werts von Flexibilität bei der Energiewende sollte in die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen schließlich auch einfließen, zu welchem Zeitpunkt bzw. wie (zeit-)flexibel die Energieeinsparungen erzielt werden können (vgl. [82], [83]).

Sowohl bei der Bestimmung der Potentiale als auch bei der Analyse des Energieverbrauchsverhaltens und der Wirkung energiepolitischer Instrumente mangelt es in vielen Fällen an einer ausreichenden Datenbasis für wissenschaftlich fundierte Analysen (vgl. etwa zur mangelnden Datenverfügbarkeit über Gebäudebestand und Sanierungsmaßnahmen [77]). Eine besondere Herausforderung stellt die Datenverfügbarkeit zudem auch international im Unternehmensbereich dar, bei dem aus diesem Grund noch deutlich weniger Analysen vorliegen als zum Energieverbrauchsverhalten privater Haushalte [67]. Ein wichtiges Ziel der Forschungsförderung muss daher im Auf- und Ausbau entsprechender Datengrundlagen liegen.

Der Abbau von Informationsdefiziten und -unsicherheiten über die Möglichkeiten und die (wirtschaftlichen) Vorteile einer Steigerung der Energieeffizienz ist von zentraler Bedeutung, da sowohl Aspekte des Marktversagens als auch verhaltens-ökonomische Hemmnisse bei der Reduktion des Energieverbrauchs adressiert werden können ([62], [77]). Verhaltens-ökonomisch motivierte Instrumente versprechen zudem sowohl die Marktakzeptanz energieeffizienterer Technologien zu erhöhen als auch einen generellen Wandel der Verbrauchs- und Nutzungsgewohnheiten anzustoßen. Gerade für derartige Instrumente und energiepolitische Ansätze liegen bislang aber nur vergleichsweise wenige, belastbare Ergebnisse zu ihrer (kausalen) Wirkung vor ([84]). Zu beachten ist ferner, dass in diesem Zusammenhang auch Untersuchungen speziell für den deutschen Energiemarkt notwendig scheinen. Internationale Erfahrungen können nur eingeschränkt übertragen werden, da das Energieverbrauchsverhalten und die Reaktion auf entsprechende Instrumente immer auch von regionalen und kulturellen Unterschieden, d.h. unterschiedlichen technischen Voraussetzungen, unterschiedlicher Einstellung gegenüber Umwelt- und Ressourcenschutz o.ä., geprägt ist ([56], [84]).

---

<sup>2</sup> Da höhere Energieeffizienz die Energiekostenbelastung senkt, entsteht ein Anreiz, die effizientere Anwendung stärker zu nutzen als zuvor. Entsprechende direkte Rebound-Effekte wurden beispielsweise in Zusammenhang mit effizienteren Heizungsanlagen identifiziert ([79], [80]); dagegen kein direkter Rebound-Effekt bei sonstigen Verbesserungen der Gebäudeeffizienz bei [81]). Energiekosteneinsparungen durch Effizienzmaßnahmen können aber auch zusätzliche Nachfrage nach anderen Produkten oder Dienstleistungen induzieren, durch die eine geringere Energieeinsparung erzielt wird als auf Grundlage der Effizienzpotentiale erwartet (indirekter Rebound-Effekt).

Forschungsschwerpunkte zur Förderung der Energieeffizienz und dem Abbau nicht-technischer Umsetzungshemmnisse sollten zusammenfassend daher auf den folgenden Aspekten liegen:

- Entwicklung eines vertieftes Verständnisses und genauere Abgrenzung der verschiedenen nicht-technischen Hemmnisse bei der Steigerung der Energieeffizienz.
- Analyse und Evaluation von Energieeffizienzpotentialen unter Berücksichtigung der Heterogenität der Energienachfrager, von sonstigen (nicht-monetären) Kosten sowie der Abhängigkeit vom Verhalten der Verbraucher und Anwender.
- Analyse und Berücksichtigung drohender Rebound-Effekte effizienterer Energieanwendungen.
- Erweiterte Bewertung von Energieeffizienzpotentialen durch Berücksichtigung von Lebenszyklusanalysen und Flexibilitätsoptionen.
- Ausbau der Datenbasis für sozio-ökonomische Studien zum Energienachfrageverhalten und zur Wirkung energiepolitischer Instrumente.
- Kritische Evaluation bisheriger energiepolitischer Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz sowie Analyse verhaltens-ökonomischer Instrumente zur Beeinflussung des Energienachfrageverhaltens.

#### **2.4.2 Nachfrageflexibilisierung**

Auch einer weiteren Flexibilisierung der Energienachfrage stehen nicht nur technische Herausforderungen, sondern oft nicht-technische Hemmnisse entgegen. Wie zuvor gehen diese Hemmnisse auch hier unmittelbar auf die grundlegenden Charakteristika des Energieverbrauchs zurück, durch die Energie weniger als Konsumgut als vielmehr als dauerhaft verfügbare Dienstleistung wahrgenommen wird. Im Gegensatz zu Energieeffizienzinvestitionen fehlen bislang jedoch mit Ausnahme von Großverbrauchern in vielen Fällen bereits die wirtschaftlichen Anreize zur Flexibilisierung der Energienachfrage, da Versorgungsverträge keine zeitvariablen Tarife vorsehen und Energieverbrauch und -kosten in der Regel nicht in Echtzeit beobachtet und abgerechnet werden können. Im Zuge der Digitalisierung werden in naher Zukunft jedoch zumindest die technischen Voraussetzungen zum Abbau dieser Informationsprobleme vorliegen (vgl. Kapitel 2.1). Neben weiteren technischen Herausforderungen einer stärkeren Flexibilisierung der Energienachfrage insbesondere in der Industrie oder dem verarbeitenden Gewerbe (vgl. Sektorsteckbriefe zu Industrie und GHD) verbleibt dennoch erheblicher Forschungsbedarf mit Blick auf die Marktakzeptanz einer Flexibilisierung der Energienachfrage.

Wie auch bei der Energieeffizienz sollten die Potentiale von Maßnahmen zur Flexibilisierung der Energienachfrage in Deutschland eingehender analysiert werden, auch mit Blick auf die zusätzlichen Potentiale über die Sektorkopplung (s. auch Kapitel 2.5.2).

Bislang existieren vor allem technische Potentialstudien und Pilotstudien, aber kaum experimentelle Potentialschätzungen (vgl. [9], [84]). Auch bei der Flexibilisierung der Energienachfrage gilt zudem, dass aufgrund regionaler und kultureller Unterschiede internationale Studien zu Potentialen sowie der Wirkung von Preissignalen etc. nur beschränkt Aufschluss über die realisierbaren Potentiale in Deutschland geben.

Unklar bleibt bislang auch, inwieweit die reine Information über den Echtzeitverbrauch und die Übermittlung von Echtzeit-Preissignalen ausreichend starke Anreize für eine deutliche Flexibilisierung der Energienachfrage setzen. Diesen wirtschaftlichen Anreizen wird zwar grundsätzlich eine hohe Bedeutung zugesprochen (z.B. [85], [65]), auch weil gerade private Verbraucher verfestigte Verbrauchs- und Nutzungsgewohnheiten aufgeben müssten. Allerdings bestehen Zweifel, ob dazu die im derzeitigen Energiemarkt erzielbaren Kostenvorteile bei Flexibilisierung der (Strom-)Nachfrage ausreichend sind (z.B. [84], [86]). Weitergehende Anreize zur Flexibilisierung der Stromnachfrage könnten beispielsweise auch über eine zeitvariable Ausgestaltung der Netzentgelte gesetzt werden [65]. Der Wirksamkeit wirtschaftlicher Anreize bzw. von Preissignalen stehen große allgemeine Informationsdefizite der Verbraucher über die Bedeutung einer Flexibilisierung der Energienachfrage und eine hohe Unsicherheit über deren tatsächliche (wirtschaftliche) Vorteile entgegen. Zusammen mit Befürchtungen, Ansätze der Nachfrageflexibilisierung könnten die Produktqualität gefährden, stellt letztere etwa im Unternehmensbereich ein starkes zusätzliches Hemmnis dar (etwa [87]). Darüber hinaus können die oben angesprochenen verhaltens-ökonomischen Besonderheiten, die von den Informationsdefiziten und der Unsicherheit begünstigt werden, die Wirkung wirtschaftlicher Anreize abschwächen (etwa [61]).

Ob die am Energiemarkt derzeit erzielbaren Kompensationen ausreichend sind, muss insbesondere mit Blick auf weitergehende Systeme zur intelligenten Steuerung der Energienachfrage hinterfragt werden. Eine breite Marktakzeptanz derartiger Ansätze setzt in jedem Fall voraus, Transparenz im Umgang mit den Verbrauchsdaten zu gewährleisten und Vertrauen der Verbraucher in den Datenschutz sowie in den Schutz vor Cyberangriffen aufzubauen (auch [9]). Fragen der Marktakzeptanz stellen sich in diesem Zusammenhang jedoch in verschärfter Form, da die intelligente Steuerung des Energieverbrauchs mit der Aufgabe von Entscheidungsautonomie bzw. dem Verlust des Gefühls der Freiwilligkeit verbunden ist, die als wichtiger (psychologischer) Faktor für die Akzeptanz bzw. Bereitschaft zu Verhaltensänderungen gilt (vgl. oben). Erste empirische Ergebnisse deuten darauf hin, dass Verbraucher zum Teil beträchtliche finanzielle Kompensation bzw. Vorteile einfordern, wenn sie Entscheidungsautonomie über den Energie- bzw. insbesondere Stromverbrauch abtreten sollen [86]. Relevant wird dies etwa auch für die Einbindung von Elektrofahrzeugen als zusätzliche Flexibilitätsoption im Sinne der Sektorkopplung und die dabei befürchteten (weiteren) Einschränkungen der Nutzbarkeit der Fahrzeuge (vgl. Sektorsteckbrief Verkehr).

Zusammenfassend ergeben sich bei der angestrebten Flexibilisierung der Energienachfrage insbesondere die folgenden Forschungsthemen:

- Analyse der realisierbaren Potentiale zur Nachfrageflexibilisierung in Deutschland, insbesondere auf Basis experimenteller Potentialschätzungen.
- Analyse der Wirksamkeit von Preissignalen zur Steigerung der Nachfrageflexibilität.
- Analyse der Marktakzeptanz intelligenter, digitaler Systeme zur Energienachfragesteuerung und ihrer Voraussetzungen.

## 2.5 Energiesystemischer Ansatz

Das Energiesystem ist von einer Vielzahl paralleler Entwicklungen gekennzeichnet, welche nicht nur aus neuen Energieerzeugungstechnologien resultieren, sondern auch aus potentiell disruptiven Veränderungen hinsichtlich Querschnittsthemen wie Verbraucherverhalten, der Entwicklung neuer Märkte und Geschäftsmodelle sowie dem Einfluss der Digitalisierung entstehen. Eine integrative Systembetrachtung stellt eine unabdingbare Voraussetzung dafür da, um Richtung und Geschwindigkeit derartiger Entwicklungen abzuschätzen und die Wirkung von Anpassungen des regulativen Rahmens zu prognostizieren.

Soll eine integrative Perspektive eingenommen werden, sind zunächst Dimension und Grenzen des betrachteten Systems zu definieren. Bei der Diskussion um das Energieversorgungssystem der Zukunft kann beispielsweise eine europäische Perspektive oder aber auch nur eine kommunale Sicht eingenommen werden. Gleichzeitig können aber auch ganz andere, viel kleinteiligere Energiesysteme wie ein Fahrzeug und eine darin verbaute Batterie betrachtet werden. Bei der Wahl des für eine Analyse geeigneten Rahmens sind Datenverfügbarkeit ebenso wie Trade-offs zwischen Detailreichtum der Analyse und notwendigen Rechenzeiten zu berücksichtigen.

Häufig erschließen sich erst über eine derartige integrative Sicht die Bedeutung sowie die Kosten und Nutzen von Maßnahmen und Elementen im Energiesystem. In besonderem Maße gilt dies etwa für den Einsatz von Flexibilitätsoptionen oder die Sektorkopplung. Den zentralen methodischen Ansatz zur Umsetzung dieser integrativen Betrachtung stellt die Energiesystemanalyse dar. Diese ist selbst Gegenstand der Energieforschung, da Methodik und Modellansätze weiterentwickelt werden müssen, gerade um die oben angesprochenen Entwicklungen im Bereich verschiedener Querschnittsthemen angemessen abbilden zu können.

### 2.5.1 Flexibilitätsoptionen

Dass Flexibilitätsoptionen für das Energiesystem der Zukunft mit seinen volatilen Erzeugungstechnologien von hoher Bedeutung sein werden, wurde in den vorangegangenen Abschnitten bereits ausführlich diskutiert. Schon das bestehende Energiesystem ist in großen Teilen nicht rein statisch sondern weist bereits gewisse Flexibilität auf. Wird von Flexibilitätsoptionen gesprochen, wird darunter daher eine Erhöhung der Flexibilität verstanden. Wie hoch der Bedarf oder der Wert von Flexibilitätsoptionen eingeschätzt wird, ergibt sich häufig erst im Kontext des betrachteten Energiesystems und in Abhängigkeit von der gewählten Systemgrenze und der Anwendung, für die eine Flexibilitätsoption genutzt werden soll. Häufig eignen sich Flexibilitätsoptionen dabei nicht nur für einen Anwendungsfall. Auch ist bei vielen der Optionen zu jedem Zeitpunkt neu zu entscheiden, wofür sie eingesetzt werden sollen. So können Optionen zur Stabilisierung des Stromnetzes und gleichzeitig zur (räumlichen und/oder zeitlichen) Glättung der Last eingesetzt werden. Je nach Zeitpunkt und Perspektive (bspw. Gesamtsystemsicht vs. Akteursperspektive) können die Anwendungen der Optionen deckungsgleich oder aber auch widersprüchlich zueinander sein [88]. Welche Flexibilitätsoptionen unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen am Ende gewählt werden sollten, ergibt sich aus der Gesamtsicht auf das jeweilige Energiesystem, beispielsweise im Rahmen der Energiesystemanalyse (siehe auch Kapitel 2.5.4).

Zu den heute diskutierten Flexibilitätsoptionen gehören sowohl erprobte Technologien, wie klassische Speicher (z.B. Batterien und Pumpspeicher) oder auch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Wärmespeicher, als auch Technologien, deren technologisches und ökonomisches Potential noch nicht abschließend beurteilt werden kann. Zu letzterer Kategorie zählen beispielsweise Optionen des Demand-Side-Managements und Power-to-X-Technologien (siehe auch Kapitel 2.5.2). Power-to-X-Technologien sind zwar keine klassischen Speicher, können jedoch aufgrund ihres Potentials zur zeitlichen Verschiebung wie solche wirken. In diesem Zusammenhang wird entsprechend auch von Funktionalen Speichern gesprochen [88].

Auf Seiten der räumlichen Verschiebung können neben dem klassischen Netzausbau Optionen wie beispielsweise das Freileitungsmonitoring, Blindleistungsmanagement, regelbare Transformatoren und Längsregler zu einer Steigerung der Flexibilität des Stromnetzes beitragen. Die Grenze zwischen räumlichen und zeitlichen Flexibilitätsoptionen ist häufig nicht eindeutig zu ziehen. Meist ergibt sich diese erst, wenn ein konkreter oder vorrangiger Anwendungsfall vorliegt.

Herausforderungen und Forschungsbedarf zu Flexibilitätsoptionen auf Ebene einzelner Technologien werden im parallel laufenden strategischen Leitprojekt A „Technologien für die Energiewende“ [89] detaillierter vorgestellt. Aus einer systemischen, integrativen

Perspektive stellen sich mit Blick auf die Flexibilitätsoptionen insbesondere die folgenden Forschungsfragen:

- Abstimmung zwischen verschiedenen Flexibilitätsoptionen, d.h. zwischen Stromspeichern, Netzausbau und Demand Response, etc.
- Identifikation und Analyse möglicher neuer Pfadabhängigkeiten durch Einsatz von Flexibilitätsoptionen.
- Analyse der technischen und regulatorischen Herausforderungen, die mit der Umsetzung von flexibilitätssteigernden Maßnahmen einhergehen.

### 2.5.2 Sektorkopplung

Ein zentrales Ergebnis systemischer Betrachtungen des Energiesystems ist, dass im Rahmen der Energiewende die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr einen wichtigen Baustein zur Dekarbonisierung darstellt [55]. Sektorkopplung kann dabei auch den Einsatz einer Vielzahl von Technologien umfassen, die die Flexibilität zwischen Energieerzeugung und -verwendung erhöhen. Elektromobilität und P-t-X-Technologien, wie Power-to-Heat oder Power-to-H<sub>2</sub>, seien nur als einige Beispiele genannt. Auch wenn eine einheitliche, anerkannte Definition von Sektorkopplung und der ihr zugrundeliegenden sektoralen Abgrenzungen bislang fehlt, sei darauf hingewiesen, dass die Abgrenzung zwischen den zu koppelnden „Sektoren“ typischerweise nicht den Anwendungssektoren entspricht, auf die sich energiepolitische Ziele beziehen und die in den übrigen Sektorsteckbriefen im Rahmen von EnFo-2030 unterschieden werden.

Bei der Diskussion um die Sektorkopplung steht regelmäßig die direkte Nutzung von Strom im Wärme- und Verkehrsbereich im Vordergrund. Allerdings ist zu prüfen, inwieweit eine Kombination von direkter und indirekter Nutzung (z.B. in Form von Power-to-Heat) nicht temporär oder auch langfristig vorteilhafter wäre. Eine direkte Verwendung von Strom ist zwar aus energetischer Sicht am effizientesten, aber nicht unbedingt aus ökonomischer Sicht. So müssen in einen Kosten-Nutzen-Vergleich verschiedener Optionen bei einer indirekten Nutzung etwa auch die mögliche Überbrückung kalter Dunkelflauten mit Hilfe CO<sub>2</sub>-neutraler chemischer Langzeitspeicher oder die (kostengünstige) Nutzung bestehender Infrastrukturen wie dem Gasnetz einfließen. Auch müssen die Vor- und Nachteile von Sektorkopplung im Vergleich zu alternativen erneuerbaren Technologien zur Bereitstellung von Wärme oder Kälte diskutiert werden (Geothermie, Solarthermie, Abfallverbrennung oder Biomasse). Es stellt sich damit die Frage nach einer Hybridisierung der Wärmeversorgung durch die gleichzeitige Nutzung von Power-to-Heat Elementen (Heizstab oder Wärmepumpe) und anderen Optionen zur Wärmebereitstellung sowie Wärmespeichern.

Unklar ist zudem, inwieweit in Deutschland ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien zur Deckung des Bruttostromverbrauchs im Zuge der Sektorkopplung bereitgestellt

werden kann. Diese Frage gewinnt insbesondere dann an Bedeutung, falls Power-to-Gas/Power-to-Liquid-Technologien mit ihrem schlechteren energetischen Nutzungsgrad zukünftig eine größere Rolle spielen und damit den Bedarf an elektrischer Energie weiter erhöhen. Es stellt sich – auch aus Kostengründen – die Frage, inwieweit die Produktion CO<sub>2</sub>-neutraler chemischen Energieträger und die Wandlung in Gas/Liquids notwendigerweise in Deutschland geschehen sollte. In [90] wird beispielsweise gezeigt, dass es weltweit kostengünstigere Standorte für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen gibt.

Zu beachten sind schließlich auch die Herausforderungen, die die Sektorkopplung mit sich bringt. So können mit zunehmender Kopplung der Sektoren etwa auch die Belastungen im Übertragungsnetz ansteigen [91]. Ein entsprechend notwendiger Netzausbau könnte wiederum neue oder verschärfte Akzeptanzprobleme hervorrufen (s. Kapitel 2.3). Nicht zuletzt mit Blick auf diese Herausforderungen und Zielkonflikte sollte nicht zu einseitig auf die Sektorkopplung zur Flexibilisierung des Energiesystems fokussiert werden, sondern auch die weiteren Flexibilitätsoptionen intelligent abgestimmt und eingebunden werden. Hierfür können die Möglichkeiten zur Vernetzung und Steuerung genutzt werden, die die Digitalisierung mit sich bringt (s. Kapitel 2.1). Neue Technologien für Leiterseile oder Stromkabel sowie lastflusssteuernde Elemente können hier ebenso helfen [91].

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- Abstimmung zwischen verschiedenen Flexibilitätsoptionen, u.a. zwischen direkter und indirekter Nutzung von Strom im Zuge der Sektorkopplung.
- Vergleich des erneuerbare Energien-Potentials unter verschiedenen Rahmenbedingungen und dessen Auswirkung auf die Ausgestaltung des Energiesystems, insbesondere im Kontext der Sektorkopplung.
- Potentiale neuer und bestehender Technologien zur Steigerung der Leistungsfähigkeit, Stabilität und Flexibilität von Stromnetzen, um den Netzausbaubedarf zu verringern sowie den Netzbetrieb zu optimieren.

### **2.5.3 Relevanz systemexogener Entwicklungen**

Die Energiewende wird nicht nur durch Entwicklungen in Deutschland bestimmt. So kann beispielsweise die Kostendegression einer Technologie aufgrund eines im Vergleich zu Deutschland frühzeitigeren Markthochlaufes im Ausland Rückwirkungen auf ihre Verfügbarkeit und Kosten in Deutschland haben. Dies gilt auch im Bereich der Flexibilitätsoptionen.

Bedeutende Entwicklungen bei den Flexibilitätsoptionen müssen nicht zwangsweise zuerst in Deutschland in den Markt gebracht werden. Beispielsweise existieren sehr viele nationale Energiesysteme mit im Vergleich zu Deutschland bedeutend anderen Charak-

teristika im Dargebot CO<sub>2</sub>-neutraler Energiequellen, so dass dort nicht unbedingt die gleichen Lösungen zum Aufbau eines dekarbonisierten Energiesystems wie in Deutschland benötigt bzw. favorisiert werden. Als Beispiel kann hier die Installation von Batteriespeichern dienen, welche in südlichen Ländern deutlich mehr Vorteile mit sich bringen können als in Deutschland. So können diese aufgrund der konstanteren PV-Erzeugung nicht nur im Sommerhalbjahr, sondern zum Teil über das gesamte Jahr hinweg genutzt werden. Gleiches gilt für die Wandler zur Herstellung von alternativen Brenn- und Kraftstoffen (Greenfuels). Werden diese in Ländern mit deutlich höheren Volllaststunden der erneuerbaren-Energien-Anlagen installiert, können diese dort deutlich kostengünstiger als in Deutschland „grüne“ Brennstoffe erzeugen [90].

Die exogenen Faktoren gilt es als Chance zu begreifen und bei der Diskussion um die „deutsche Energiewende“ den Blick auf andere Energieversorgungssysteme in der Welt zu richten. Hieraus ließen sich für andere Märkte relevante Technologien identifizieren und globale Markthochlaufszszenarien und Verfügungsbarkeitsszenarien erstellen. Analysen über Markt- und Entwicklungspotentiale müssen dabei jedoch einen klaren regionalen Bezug aufweisen, da sich beispielsweise Finanzierungsrisiken und damit Realisierungschancen in den einzelnen Ländern deutlich unterscheiden können. Eine Einbeziehung dieser internationalen Betrachtung in Systemanalysen hat das Potential, die Prognosen von Lerneffekten und Kostenänderungen erheblich zu verbessern.

Zusammenfassend lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- Analyse von internationalen Marktpotentialen von für die Energiewende relevanten Technologien.
- Verbesserung des Verständnisses globaler Determinanten von Technologieentwicklung.
- Berücksichtigung von internationalen Entwicklungen bei Prognosen von Lernkurven und Kosten für Energieerzeugungstechnologien und Flexibilitätsoptionen.

#### **2.5.4 Energiesystemanalyse**

Die bisherigen Ausführungen zu Flexibilitätsoptionen, Sektorkopplung und der Relevant systemexogener Entwicklungen verdeutlichen, dass die zukünftige Ausgestaltung von Energiesystemen eine inhärent systemische Betrachtungsweise erfordert. Aufgrund der Vielzahl von Optionen zur Systemausgestaltung, Unsicherheiten über die Entwicklung wichtiger Systemkomponenten (technisch wie gesellschaftlich) sowie komplexer Wechselwirkungen ist das Methodenfeld der Energiesystemanalyse entstanden. In diesem werden neue Methoden zur Analyse von Energiesystemen entwickelt und Auswertungen hinsichtlich unterschiedlicher Szenarien bezüglich der Entwicklung von Rahmenbedingungen und Technologien durchgeführt.

Obwohl sich die Energiesystemanalyse in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt hat, besteht nach wie vor Forschungsbedarf. So vernachlässigen Effizienzbetrachtungen häufig die Problematik von Rebound-Effekten [92], die dazu führen, dass unterstellte Effizienzgewinne sich nicht zwangsweise manifestieren. Auch Fragen der Akzeptanz, strategischer Interaktionen auf Energiemärkten und des Energienachfrageverhaltens werden bislang häufig nur rudimentär integriert. Entsprechend sind die tatsächlichen Kosten, die sich aus unterschiedlichen Systempfaden ergeben, vielfach nicht adäquat in Energiesystemmodellen berücksichtigt und die Modelle zeichnen häufig ein gegenüber der Realität verzerrtes Bild (vgl. auch Kapitel 2.4). Im Rahmen zukünftiger Energieforschung sollte entsprechend ein verstärktes Augenmerk auf die explizite Modellierung von Entscheidungen auf der Nachfrageseite gelegt werden. Im Zuge dessen gilt es auch der bestehenden Heterogenität von Marktakteuren Rechnung zu tragen. So könnten hier Multi-Agent- bzw. Heterogenous-Agent-Modelling Ansätze verstärkt angebracht werden. Relevante (methodische) Herausforderungen liegen auch in der Modellierung und Abbildung von Unsicherheit, beispielsweise über die weitere Entwicklung von Technologien, oder auch in der Modellierung der Wechselwirkungen zwischen einer weitergehenden internationalen Integration der Energiemärkte und -Systeme und der Kopplung von Sektoren.

Von besonderer Bedeutung ist darüber hinaus die Validierung von Energiesystemmodellen. Um dies zu erreichen, ist eine breite und tiefe Datenbasis notwendig. Kleine Forschungseinrichtungen können häufig nicht den Aufwand erbringen, solch eine Datenbasis zu erarbeiten und zu pflegen. Daher sollte weiter in die Bereitstellung öffentlich verfügbarer Datenquellen investiert werden.

Die Energiesystemanalyse bewegt sich meist innerhalb eines engen Szenariotrichters, obwohl die Vergangenheit immer wieder gezeigt hat, dass es disruptive Ereignisse geben kann, welche zu signifikant anderen Lösungen führen können. Auf die Identifikation der relevanten Stellschrauben und Analysen der mit disruptiven Ereignissen einhergehenden Auswirkungen hat sich die Energiesystemanalyse bislang zu wenig eingestellt. Ferner sollte bei der Formulierung von Szenarien selbst vermehrt auf eine konsistente Ausgestaltung geachtet werden [93]. So ist die Verwendung von in sich schlüssigen Rahmenbedingungen und Eingangsparametern als eine weitere Voraussetzung für robuste Szenarien zu sehen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist im Kontext der Systemanalyse auf nationaler Ebene Ansätze zu multikriterieller Bewertung zu finden und die Verknüpfung von Subsystemen genauer zu betrachten. Unter Subsystemen ist beispielsweise die Verbindung zwischen Wärme- und Stromversorgung zu verstehen. Bei der multikriteriellen Bewertung sind nicht nur CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten die ausschlaggebenden Faktoren, sondern beispielsweise auch die Akzeptanz (vgl. Kapitel 2.3) und andere Umweltwirkungen, welche

mithilfe von Life-Cycle-Assessment (LCA)-Methoden bewertet werden können. Hierfür wie auch zur Abbildung neuer Marktstrukturen ist es erforderlich, neue Modellierungsansätze zu entwickeln.

Die Verknüpfung der Energiesystemanalyse mit LCA für sich allein ist bereits ein bedeutendes Forschungsfeld. Eine der größten Herausforderungen für das LCA besteht in der Weiterentwicklung von einer produktbezogenen Bewertung hin zu einer zukunftsgerichteten (prospektiven) LCA, welche ein Verständnis des Energiesystems erforderlich macht. In diesem Prozess nimmt die Entwicklung von Methoden zur Verknüpfung der LCA mit Methoden der Energiesystemanalyse eine zunehmend wichtige Rolle ein. Denn im Rahmen der Energiesystemanalyse werden Szenarien der zukünftigen Entwicklung des Energiesystems aufgezeigt, welche notwendig sind, um umweltrelevante Aussagen über Zukunftstechnologien treffen zu können.

Zusammenfassend lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

- Verbesserung der Validierungsmöglichkeiten von Energiesystemmodellen durch eine kontinuierliche Veröffentlichung von Daten und Bereitstellung einer frei zugänglichen Datenbasis.
- Weiteres Öffnen des Szenariotrichters zur Identifikation von disruptiven Ereignissen und Analyse der damit einhergehenden Auswirkungen.
- Weiterentwicklung von Methoden zur multikriteriellen Bewertung von Energiesystemen.
- Weiterentwicklung der Energiesystemanalyse durch Validierung, Öffnen des Szenariotrichters, Berücksichtigung von Rebound-Effekten sowie insgesamt verfeinerte Abbildung der Nachfrageseite und Durchführung prospektiver LCA's.

## 2.6 Regulatorischer Rahmen

Seit der Liberalisierung der Energiemärkte stehen diese im Spannungsverhältnis zwischen Wettbewerb und Regulierung. So wird im liberalisierten Energiemarkt möglichst weitgehend auf dezentrale Entscheidungen der Marktteilnehmer bzw. Marktakteure vertraut. Im Energiekonzept der Bundesregierung vom September 2010 werden ehrgeizige langfristige Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien, die Steigerung der Energieeffizienz und die Reduktion der Treibhausgasemissionen bei gleichzeitigem Ausstieg aus der Kernenergie festgesetzt. Für diesen Umbau und die Weiterentwicklung des Energieversorgungssystems im Zuge der Energiewende bedarf es (wirtschaftlicher) Anreize, die im Wesentlichen über den regulatorischen Rahmen gesetzt werden.

Dabei ist bei der Analyse des langfristigen Rahmens für die Transformation darauf zu achten, dass intensiver Wettbewerb bei der Stromerzeugung und im -vertrieb weitestgehend ermöglicht wird. Regulierende Eingriffe müssen sich grundsätzlich auf Bereiche

fokussieren, in denen Märkte aufgrund von Gründen des Marktversagens nicht effizient funktionieren oder die Grundlage für marktliche Koordination erst geschaffen werden muss. Letzteres ist gerade im Energiebereich von besonderer Bedeutung. So stellen der Ausbau der erneuerbaren Energien und die fortschreitende Sektorkopplung weitreichende Anforderungen an eine effektive und flexible Netzregulierung. Der erwünschte Wettbewerb zwischen unterschiedlichen regenerativen Energiequellen und deren Wettbewerb mit konservativen Energieträgern im Strommarkt aber auch in Gasmärkten erfordert eine intelligente Netzsteuerung und den dafür passenden Regulierungsrahmen. Dieser ist auch notwendig, um etwa bei Senkung der Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich, im Verkehr oder bei den erneuerbaren Energien ineffiziente Marktergebnisse zu korrigieren. So setzt eine CO<sub>2</sub>-Bepreisung effiziente Anreize zum Klimaschutz. Bei der Förderung erneuerbarer Energien sind etwa nicht-kompensierte Wissens-Spillers bei Forschung und Entwicklung, Innovationen, Diffusion und Adoption neuer CO<sub>2</sub>-armer Technologien zu beachten. Das Energiesystem ist durch hohe Investitionsrisiken, Pfadabhängigkeiten und Lock-ins gekennzeichnet, die potenzielle Ineffizienzen nach sich ziehen und ergänzende staatliche Eingriffe erforderlich machen können. Im Verkehrsbereich kann die Unterstützung des Marktaufbaus der erforderlichen Infrastrukturen für alternative Treibstoffe ökonomisch geboten sein. Im Gebäudebereich können etwa fehlende bzw. asymmetrische Informationen bei der energetischen Erneuerung bestehen. Energieeffizienzinvestitionen können wegen begrenzter Rationalität der Akteure unterbleiben (vgl. Kapitel 2.4). Wirtschaftliche Anreize sind notwendig, um Investitionen in innovative Technologien, die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle sowie weitere privatwirtschaftliche Forschung und Entwicklung anzustoßen, aber auch um Verhaltensmuster u.U. aufzubrechen und neue Nutzungs- und Verbrauchsgewohnheiten zu etablieren bzw. die Flexibilität der Nachfrage zu steigern und Lastmanagement bei Unternehmen und Haushalten zu etablieren.

Bei der Bewertung der Ziele und Maßnahmen stellt das energiepolitische Zieldreieck aus Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Sicherheit den konzeptionellen Maßstab dar. Sich verändernde Zielkonflikte in der Abwägung zwischen den Dimensionen des energiepolitischen Zieldreiecks lassen zumindest eine Überprüfung und gegebenenfalls Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens erforderlich erscheinen. So sind Anreize so zu setzen, dass über die dezentrale Koordination der verschiedenen Akteure die besonderen und im Zuge der Energiewende veränderten Voraussetzungen für Versorgungssicherheit und Systemstabilität insbesondere im Bereich der Stromversorgung (möglichst weitgehend) gewährleistet sind. Zum anderen muss über das Anreizsystem mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit der Energieversorgung sichergestellt werden, dass nicht nur aus privatwirtschaftlicher sondern aus Systemsicht möglichst kosteneffiziente Lösungen für die konkrete Umsetzung der klima- und energiepolitischen Zielsetzungen gefunden werden. Die Voraussetzungen und Anforderungen an die

grundlegenden Koordinations- und Anreizfunktionen des regulatorischen Rahmens verändern sich dabei durch den höheren Bedarf an Flexibilität verbunden mit der steigenden Zahl an Akteuren, durch zunehmend dezentralere Strukturen sowie sich immer mehr auflösende Grenzen zwischen Sektoren und zwischen Energiebereitstellung und -nachfrage im Zuge des Umbaus des Energieversorgungssystems. Anpassungsbedarf für den regulatorischen Rahmen folgt zudem auch aus der Digitalisierung und der immer engeren Vernetzung von Akteuren und Anwendungen.

Die Ausgestaltung des regulatorischen Rahmens für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende steht vor einem Zielkonflikt: Wie in den Sektor-Steckbriefen deutlich wird, ist die Entwicklung neuer Technologien sowie die Marktdiffusion neuer Technologien über neue Geschäftskonzepte für das Gelingen der Energiewende erforderlich. Dabei versprechen eine möglichst technologie-offene Ausrichtung der Anreize an den übergeordneten klima- und energiepolitischen Zielen und ein weitgehendes Vertrauen auf die Marktkräfte Effizienzvorteile in der Transformation. Das freie Spiel der Marktkräfte nutzt das kreative Potential und das Wissen (bzw. den Wissensvorsprung) der einzelnen Marktteilnehmer weit besser als detaillierte und engmaschige staatliche Vorgaben. Die Probleme im Energiebereich etwa im Kontext der beschriebenen starken technologisch und Infrastruktur-bedingten Pfadabhängigkeiten (und Netzwerkeffekte), hoher Kapitalkosten und langfristiger klimapolitischer Zielsetzungen und Investitionsentscheidungen stehen diesem Gedanken der Konkurrenz der Ideen und Geschäftskonzepte teilweise entgegen und erfordern unter Umständen ein deutlich konkreteres Eingreifen des Staates in den Markt und ein engeres Setzen von Rahmenbedingungen. Im Bereich des Stromversorgungssystems lassen sich zudem zusätzliche regulatorische Vorgaben über die besonderen technischen Voraussetzungen der Versorgungssicherheit und Systemstabilität begründen.

Bei der Ausgestaltung des regulatorischen Rahmens sind zudem Verteilungswirkungen, Stabilität und Verlässlichkeit von Regulierung sowie europäische und internationale Interdependenzen zu berücksichtigen. Durch Gesetze, Maßnahmen und Ausnahmeregelungen werden Verteilungseffekte erzeugt, die in spezifischen Bereichen zu Problemlagen führen können. Beispielhaft für die Bedeutung der Verteilung von Kosten und Risiken sind die Auswirkungen steigender Energiepreise auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven Industrie oder soziale Auswirkungen auf private Haushalte, im Besonderen für einkommensschwache Haushalte. Gegeben die starken Pfadabhängigkeiten und den meist hohen Kapitalbedarf von Energieinvestitionen sind zudem die längerfristige Regulierungsstabilität und der Abbau möglicher Unsicherheiten von besonderer Bedeutung. Die Transformation des Energiesystems in Deutschland ist eng mit den energiepolitischen Ansätzen der Nachbarländer verwoben. Klimapolitik bedarf aber auch einer globalen Perspektive. Der (nationale) regulatorische Rahmen muss

diese Interdependenzen betrachten und mit supra-nationaler Regulierung abgestimmt werden.

Die skizzierten Herausforderungen für die Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens müssen in der Energieforschung aufgegriffen werden. Hierbei können sowohl empirische (ökonometrische ex-post-Analysen) wie auch theoretische Analysen von Bedeutung sein. Insbesondere (ex-ante) Systemanalysen mit Energiemodellen können helfen, in Simulationen mögliche Veränderungen in den regulatorischer Rahmenbedingungen zu analysieren. Im Folgenden werden einige Forschungsfragen für den Regulierungsrahmen etwa bei der Weiterentwicklung der Erneuerbarenförderung, der Netzregulierung, der Flexibilisierung des Energiesystems sowie der Sektorkopplung näher skizziert.

### **2.6.1 Weiterentwicklung der Förderung der erneuerbaren Energien und langfristige Marktintegration**

Mit der Einführung von Ausschreibungen wurde ein grundlegender Systemwechsel bei der Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien eingeleitet. Hierdurch ist auch ein Schritt zur Marktintegration der erneuerbaren Energien getan worden. Allerdings ist der eingeschlagene Pfad zu mehr Wettbewerb allein auf den Wettbewerb der zukünftigen Anlagenbetreiber mit ihren jeweiligen Anlagen innerhalb ihrer Sparte beschränkt. Dem Wettbewerb des Strommarktes an sich und der Konkurrenz aller Technologien untereinander sind die erneuerbaren Energien weiterhin nicht ausgesetzt [94]. Wie kann der Rahmen für die Erneuerbarenförderung so weiterentwickelt werden, dass statt eines staatlich regulierten Ausbaus verstärkt in die kostengünstigste Technologie investiert wird? Hierbei sind die Systemkosten zu betrachten und eine (System-)Kosteneffizienz sicherzustellen. Welche Rolle kann eine technologie-spezifische vs. technologie-neutrale Förderpolitik spielen und in welchem Umfang sind administrierte Vorgaben bei technologieneutralen Ausschreibungen erforderlich?

Bei der Überwindung von Pfadabhängigkeiten, die der Entwicklung und Einführung neuer Technologien – nicht nur im Strom-, sondern auch im Verkehrsbereich – im Wege stehen, geht es, statt einer reinen Förderung des Kapazitätsaufbaus, um die Unterstützung der Technologieentwicklung. Wie können die Kosten vergleichsweise junger Technologien mittelfristig gesenkt werden und in welchem Maße ist eine Förderung für einzelne Technologien überhaupt notwendig? Welche Technologien sind in langer Frist für die Dekarbonisierung erforderlich (breakthrough technologies) und wie kann eine ökonomisch sinnvolle Technologieentwicklung aussehen? Eine besondere Bedeutung hat in diesem Zusammenhang die (System-)Kosteneffizienz der Förderung der erneuerbaren Energien, auch mit Blick auf die Akzeptanz des Fördersystems (vgl. Kapitel 2.3).

Nach der obligatorischen Direktvermarktung ist der eingeleitete Systemwechsel von der Preissteuerung zur Mengensteuerung ein weiterer Schritt auf dem Weg, die demnächst

bei der Stromerzeugung dominierenden erneuerbaren Energien vermehrt dem Wettbewerb auszusetzen. Allerdings ist ein zukunftsfähiges Strommarktregime unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften der (fluktuierenden) erneuerbaren Energien noch nicht gefunden. Der Ausbau der Stromerzeugung bleibt weiterhin stark abhängig von staatlichen Regulierungsvorgaben und den damit verbundenen politischen Risiken. Mit Blick auf das erforderliche Marktdesign ist die Frage der kosteneffizienten Risikoallokation im Gesamtsystem zu beantworten, um mittel- und langfristig hinsichtlich der erneuerbaren Energien eine angemessene Verteilung der Risiken zwischen Anlagenbetreiber und Allgemeinheit zu erreichen [9]. Unter Berücksichtigung der Finanzierungskosten für Investoren [95] und einem möglichen Trade-off zwischen Risiko(-Prämien) und Effizienz ist zu prüfen, wie Anlagenbetreiber stärker an die Übernahme der Marktrisiken herangeführt werden können und die Integration auch in den europäischen Elektrizitätsbinnenmarkt gelingen kann.

Sind die Erlöse von Preisen am Strommarkt und somit von den Knappheiten entkoppelt, werden die langfristig notwendigen Produktions-, Investitions- und Stilllegungsentscheidungen nicht kosteneffizient getroffen. Wie und in welchem Maße soll die Förderung an den Großhandelspreis gekoppelt werden? Strommarktorientiertes Verhalten könnte zum Beispiel in einem ersten Schritt durch den Wechsel auf Vergütung einer festen Anzahl an Volllaststunden-Äquivalente erreicht werden. Dem Anlagenbetreiber eröffnet dies Spielräume, sich systemdienlich zu verhalten, ohne dabei finanzielle Einbußen befürchten zu müssen. Perspektivisch wäre eine dauerhafte Finanzierung im Wettbewerbsmarkt zu untersuchen oder zumindest der Übergang auf ein Festprämienmodell [96]. Hier spielen auch die CO<sub>2</sub>-Bepreisung und entsprechend steigende Großhandelsstrompreise eine wichtige Rolle. Eine weitere Option zur strategischen Weiterentwicklung des Systems stellt die Verlagerung zu Leistungsprämien anstelle von Bonuszahlungen für Energielieferungen dar, wobei die Leistungsprämien über Leistungsentgelte auf die Letztverbraucher umgelegt oder über den allgemeinen Staatshaushalt finanziert werden.

In diesem Kontext stellt sich auch die Frage, wie die für den weiteren Ausbau und die Integration der erneuerbaren Energien notwendigen Flexibilitätsoptionen (vgl. Kapitel 2.5.1) effizient in das Energiesystem integriert werden und wie ein Regulierungsrahmen für ihre Finanzierung aussieht. So werden etwa Speicher, Back-up Kapazitäten und Nachfrageflexibilisierung eine wichtige Rolle übernehmen. Hier kommt lokalen Flexibilitätsoptionen eine besondere Bedeutung zu [97]. Der Regulierungsrahmen zur Finanzierung dieser Flexibilisierungsoptionen und ihrer effizienten Interaktion ist aber noch unklar und die Verteilung der Kosten auch über verschiedene Sektoren zu untersuchen.

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Forschungsfragen für den regulatorischen Rahmen ableiten:

- Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens für die Förderung erneuerbarer Energien.
- Marktintegration von erneuerbaren Energien und Risikoverteilung.
- Vermeidung von Pfadabhängigkeiten und Identifikation kritischer Technologien.

### **2.6.2 Abstimmung zwischen Ausbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten und Anpassung bzw. Ausbau der (Netz-)Infrastruktur**

Die Energiewende erzeugt zunehmend regionale Ungleichgewichte zwischen Elektrizitätserzeugung und -nachfrage. Diese werden einerseits durch den Ausbau erneuerbarer Energien, vor allem im Norden, ausgelöst, andererseits durch den Rückgang konventioneller Energieerzeugung, zum Beispiel durch die Abschaltung von Kernkraftwerken. Diese regionalen Ungleichgewichte sollen vor allem durch einen erheblichen Netzausbau behoben werden. Daneben gibt es einen Trend zu dezentraleren Erzeugungsstrukturen, der technisch getrieben ist bzw. auf Präferenzen der Akteure basiert. Steigende Kostenpositionen für Redispatch-Maßnahmen und Einspeisemanagement sowie für die Vorhaltung und den Einsatz von Reservekraftwerken und abschaltbare Lasten erhöhen den Problemdruck und zeigen, dass auch Flexibilitätsoptionen aus Speichern, Nachfrageflexibilisierung und Sektorkopplung Berücksichtigung finden müssen. Bislang fehlt die Abstimmung zwischen Kapazitätsaufbau auf Erzeugungsseite und der erforderlichen Netzinfrastruktur bzw. dem Aus-/Umbau der gegebenen Netzinfrastruktur weitestgehend.

Durch die gezielte Stärkung von zeit- und regionalspezifischen Preissignalen könnte hier eine deutliche Kostensenkung im Energiesystem erzielt werden. Effiziente Entgelte sollten auslastungsabhängig gestaltet sein. So ist die Netzauslastung zu Spitzenlastzeiten und in Regionen mit stark begrenzten Netzkapazitäten besonders hoch. Das Fehlen entsprechender Preissignale dürfte ein Grundproblem des Energiemarktdesigns sein. Knappheitspreise setzen Anreize für Stromerzeuger (Investoren und Produzenten), ihr Verhalten an die Knappheit von Strom am Markt und die Auslastung des Netzes anzupassen. Netzengpässe werden in der jetzigen Netzentgeltsystematik kaum berücksichtigt. Das vielfältige Umlegen von Kosten auf die Allgemeinheit etwa für Redispatch schränkt die Wirksamkeit von Preissignalen weiter ein. Neben einer Marktlösung für eine nutzungsorientierte Netzbepreisung (Nodal Pricing) wäre hier die Einführung räumlich und zeitlich differenzierter Netzentgelte für Ein- und Ausspeiser zu prüfen. Eine andere Option ist das Market Splitting [96]. Hierbei wären leistungs- und arbeitsbasierte Umsetzungen möglich, die auch um eine zeitliche Dimension erweitert werden könnten. Voraussetzung für die Umsetzung zeitflexibler Faktoren ist aber die Fähigkeit der Netzbetreiber, die Netzbelastung viertelstundengenau zu prognostizieren sowie die Ausstattung aller Netznutzer mit intelligenten Zählern (Smart Meter). Auf dieser Basis könnten Energiedienstleister neue Geschäftsmodelle für die weitgehend automatische Steuerung von

geeigneten Elektrizitätsabnehmern und -erzeugern entwickeln. Auch ein erzeugerseitiges Netzentgelt für Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien kann die Steuerung des Zubaus und die Verteilung der Netzkosten unterstützen [94].

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Forschungsfragen für den regulatorischen Rahmen ableiten:

- Auch langfristig effiziente Abstimmung zwischen dem Ausbau der erneuerbaren Energien und dem Aus- und Umbau der Netzinfrastruktur.
- Potentiale von zeit- und regionalspezifischen Preissignalen zur Erhöhung der Systemeffizienz bzw. Minimierung der Systemkosten.
- Weiterentwicklung der Bepreisung der Netznutzung.

### **2.6.3 Anreize zur weiteren Sektorkopplung/Elektrifizierung**

Die Umsetzung der Klimaschutzziele setzt mittel- bis langfristig auch im Verkehrs- und Wärmesektor den verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien voraus. Aus technischen, ökonomischen und nachhaltigkeitsbezogenen Gründen ist das Potential des direkten Einsatzes aber sehr begrenzt. Mittelfristig ist zudem bei zunehmender Durchdringung fluktuierender regenerativer Erzeuger damit zu rechnen, dass nicht mehr nur lokal, sondern temporär auch regional und national größere Stromüberschüsse auftreten, die mit konventionellen nachfrageseitigen Maßnahmen nicht kompensiert werden können und für die stationäre Stromspeicher (Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Batterien etc.) aus Kapazitätsgründen und evtl. aus Kostengründen nur eingeschränkt als Lösung infrage kommen. Durch die Sektorkopplung soll dieser Strom fossile Energien im Wärme- und Transportbereich ersetzen. Auf diese Weise werden aber auch zusätzliche Stromabsatzpotentiale im Wärme- und Kraftstoffsektor geschaffen. Bisher steht bei der Betrachtung der Sektorkopplung die technische Effizienz als dominantes Kriterium im Mittelpunkt. Andere Kriterien wie beispielsweise die ökonomische Realisierbarkeit und die dafür erforderlichen längerfristigen Rahmenbedingungen werden hingegen kaum betrachtet.

In diesem Zusammenhang erscheint die Weiterentwicklung des Systems von Entgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen auf Energie erforderlich, welches in seinen Auswirkungen und Gestaltungsmöglichkeiten zu untersuchen ist ([98], [94], [99]). Die überwiegend arbeitspreisbasierte Erhebung von staatlich induzierten und regulierten Strompreisbestandteilen stellen augenblicklich ein Hemmnis für verbrauchsseitige Flexibilitäten und die Sektorkopplung dar. Technologien zur Sektorkopplung können nur dann wirtschaftlich betrieben werden, wenn der Arbeitspreis der eingesetzten Elektrizität deutlich unterhalb der Arbeitspreise der zu ersetzenden fossilen Energien liegt. Anreize zur Sektorkopplung werden durch Einführung eines über alle Sektoren hinweg einheitlichen CO<sub>2</sub>-Preises gesetzt. Hier sind auch die Sektorgrenzen von Bedeutung, an denen der Wett-

bewerb noch zugunsten klimaschädlicherer Technologien verzerrt ist: Die derzeit hohe Belastung des Stroms macht Stromverbrauch im Wärme- und Transportsektor unattraktiv, obwohl kostengünstiger Strom aus erneuerbaren Quellen zunehmend in anderen Sektoren eingesetzt werden sollte. Durch eine Änderung der Verteilung und Finanzierung der Förderkosten für erneuerbare Energien, etwa im Rahmen einer verstärkten Steuerfinanzierung oder durch eine Ausweitung des Kreises der Umlagen-Finanzierer, entstehen im Übergang ebenfalls stärkere Anreize zur Sektorkopplung und Flexibilisierung der Stromnachfrage [9]. Auch die zeitliche und regionale Dynamisierung sowie Verlagerung der Netzentgelte hin zu höheren Leistungspreisen unterstützen die Sektorkopplung. Forschung zur Reform des Preismodells von Energie, d.h. des Systems aus Netzentgelten, Energie- und Stromsteuer und EEG-Umlage [100] sollte Transitionspfade analysieren und dabei insbesondere die jeweiligen Verteilungswirkungen untersuchen.

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Forschungsfragen für den regulatorischen Rahmen ableiten:

- Finanzierung von Flexibilitätsoptionen und Kostenverteilung in der Sektorkopplung.
- Ökonomische Potentiale für die Sektorkopplung und kritische Technologien.
- Weiterentwicklung der Systematik von Abgaben, Umlagen und Steuern auf Strom.

#### **2.6.4 Versorgungssicherheit und regulatorischer Rahmen**

Ohne Zweifel wäre die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende und die Reputation des Wirtschaftsstandorts Deutschland gefährdet, wenn die gesicherte Versorgung mit Energieträgern, insbesondere Elektrizität nicht mehr gewährleistet wäre. Es muss dazu unter Umständen gar nicht unbedingt zu effektiven Versorgungsunterbrechungen kommen, wenn die Versorgungssicherheit in Frage gestellt wird. Die Versorgungssicherheit könnte über die sogenannte Leistungsbilanz der Stromversorgung eingeordnet werden, welche den Umfang der gesicherten Kraftwerkskapazitäten zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast beziehungsweise zu einem definierten Referenzzeitpunkt, der die voraussichtlich kritischste Versorgungssituation ausweist. Vertiefte Analysen wären in diesem Kontext wünschenswert, insbesondere eine regional differenzierte Betrachtung. Entsprechend ist zu klären, ob es zur Gewährleistung einer gesicherten Kraftwerksleistung erforderlich werden könnte, Kapazitätsmechanismen zu schaffen, und wie diese gegebenenfalls auszugestalten wären. In verschiedenen EU-Mitgliedsstaaten sind Kapazitätsmechanismen eingeführt worden. Neben einer geeigneten Methodik zur Bewertung der Versorgungssicherheit ist auch die politische Frage nach einer länderübergreifenden Zusammenarbeit und Koordination der Versorgungssicherheit zu erörtern [9].

Eine wichtige Rolle für die Versorgungssicherheit spielt das Smart Market Design und die Frage, wie verschiedene Optionen zur Flexibilisierung des Energiesystems (Sektor-kopplung, Speicher, Nachfrage, vgl. Kapitel 2.1 und 2.5) effizient aufeinander abge-stimmt, gefördert und finanziert werden können. Welche zusätzlichen Anreize braucht es zur Belohnung von Flexibilität im Strommarkt etwa zur Finanzierung von Speichern und Back-up-Kapazitäten sowie für eine Flexibilisierung der Nachfrage (vgl. auch Kapi-tel 2.4.2)? Wie ist die Ausgestaltung der bestehenden Kapazitätsreserve zu bewerten? Wie können Haushalte und „Prosumer“-Kleinanlagen in lokale Energiemärkte und Microgrids integriert werden und welches Marktdesign schafft hier eine entsprechende Akzeptanz? Dabei können Eigenverbrauch, Verteilnetzentlastung und regionale Ver-marktung von Bedeutung sein.

Die fortschreitende Digitalisierung spielt hierbei eine wichtige Rolle zur Erhöhung der Versorgungssicherheit und bedarf ebenfalls geeigneter Rahmenbedingungen (vgl. auch Kapitel 2.1). Neue digitale Geschäftsmodelle bei einer zunehmend dezentralen Energie-versorgung sollten identifiziert und analysiert werden. So ermöglicht die Digitalisierung die Entwicklung hin zu einem „Echtzeit-Markt“ durch die Verkürzung der Fristen zwi-schen Zeitpunkt physischer Lieferung und Handelsschluss. Virtuellen Kraftwerken, ba-sierend auf der Aggregation und Steuerung dezentraler Einheiten, kommt als mögliche Flexibilitätsoption eine zentrale Rolle zu, wenn die technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen es erlauben. Neben virtuellen Kraftwerken und Microgrids könnten dabei auch lokale Reserveenergiemärkte für Haushalte eine Rolle spielen [101]. Durch die zunehmende Flexibilisierung des Energiesystems ergibt sich zunehmender Anpas-sungsbedarf an die regulatorischen Rahmenbedingungen. Hierbei spielen auch die In-formationen- und Kommunikationsstrukturen und deren Standards eine große Rolle.

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Forschungsfragen für den regulatori-schen Rahmen ableiten:

- Ausweis der Versorgungssicherheitssituation für Deutschland im EU-Kontext.
- Notwendigkeit von Kapazitätsmechanismen in mittlerer Sicht.
- Smart Market Design und Abstimmung verschiedener Flexibilitätsoptionen.
- Rolle der Digitalisierung und Entwicklung von Echtzeitmärkten.

### 3 Adressierung im sechsten EFP

Die Leitlinien und Schwerpunkte der Energieforschungsförderung werden bislang im sechsten Energieforschungsprogramm (EFP) charakterisiert. Die Förderthemen werden mit Ausnahme ressort-übergreifender Förderinitiativen gegliedert nach den einzelnen, in die Forschungsförderung eingebundenen Ressorts beschrieben und nicht gegliedert nach (Anwendungs-)Sektoren und sektorübergreifenden Themen wie in der vorliegenden Studie.

Das sechste Energieforschungsprogramm legt einen relativ starken Fokus auf die Weiter- und Neuentwicklung von Energietechnologien, zu denen detailliert strategische Förderschwerpunkte ausgeführt werden. Sozio-ökonomische und systemische Forschungsthemen, die Gegenstand der vorangegangenen Kapitel waren, nehmen dagegen weniger Raum ein. Sie werden generell vor allem bei den ressortübergreifenden Förderinitiativen zu Netzen, Energiespeichern und energieeffizienten Städten – bei diesen wird der ressortübergreifende Ansatz gerade unter Verweis auf die Relevanz und Komplexität von Systemzusammenhängen begründet (vgl. Kapitel 2 in [102]) – im Programmteil des BMBF (vgl. neue Forschungsagenda in [102], S. 107) sowie im Zusammenhang mit der Systemanalyse als Förderthema angesprochen. Einen stärker systemischen Blickwinkel weisen darüber hinaus auch die Kapitel 4.7 und 4.8 zu „Integration erneuerbarer Energien und regenerative Energieversorgungssysteme“ sowie „Querschnittsforschung: Rahmenbedingungen für einen hohen Anteil erneuerbarer Energien ([102], S. 91 ff.) im Programmteil des BMU auf. Mit seiner Weiterentwicklung zur zweiten Förderphase misst der BMWi-Programmteil Systemzusammenhängen und der Einbindung sozialwissenschaftlicher Disziplinen nochmals höhere Bedeutung bei (vgl. [103]). So werden unter anderem interdisziplinäre Forschungsansätze unter Einbindung der Sozialwissenschaften explizit gefordert und gefördert. Insgesamt bleibt dennoch festzuhalten, dass im sechsten EFP die technologischen FuE-Herausforderungen im Zentrum stehen. Sie werden wesentlich detaillierter ausgeführt, aber meist unabhängig von sozio-ökonomischen und systemischen Fragestellungen dargestellt. Das Programm würdigt grundsätzlich an verschiedenen Stellen die Bedeutung sozio-ökonomischer Forschung und einer breiteren Systemperspektive. Eine konkretere Berücksichtigung relevanter Forschungsthemen in diesen Bereichen sowie ihre stärkere Integration auch in technologische Entwicklungsprozesse erscheint für die Zukunft jedoch wünschenswert (vgl. auch Kapitel 4.1 zur integrativen Energieforschung im Endbericht von EnFo-2030).

#### *Digitalisierung*

Das sechste EFP benennt in den verschiedenen Programmteilen bereits zentrale Themen im Kontext der Digitalisierung, auch wenn die Digitalisierung als Oberbegriff oder eigenständiger Förderschwerpunkt noch nicht explizit aufgeführt wird. Adressiert werden

insbesondere die neuen Möglichkeiten der Regelung und Messung über neue Informations- und Kommunikationstechnologien zur intelligenten Gestaltung und effizienten Betriebsführung der Energienetze zur Einbindung fluktuierender erneuerbarer Energien. Darunter fallen Stichworte wie Smart Meter und Smart Grids, aber auch Möglichkeiten der Nachfragesteuerung (Demand Side Management). Das sechste EFP verweist zudem auf die Möglichkeiten verfeinerter Modellierungen zur Planung des Netzausbaubedarfs und generell im Bereich der Systemanalyse, bei der neue Entwicklungen in der Informationstechnik und neue mathematische Verfahren es erlauben, realistischere Szenario-Berechnungen durchzuführen und komplexe Zusammenhänge genauer zu verstehen. Darüber hinaus spricht das EFP die Möglichkeiten zu verbesserten Einspeise- und Lastprognosen, den Zusammenschluss von Kraftwerken und Stromspeichern zu virtuellen Großverbänden und die Einbindung von Elektrofahrzeugen mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien an. Im Programmteil des BMBF wird auch die Energieeffizienz von Informationstechnik zumindest im Gebäudebereich thematisiert. Im Vergleich zu dem in Kapitel 2.1 oben angesprochenen Forschungsbedarf fehlt vor allem der Verweis auf die Sicherheit der neu entstehenden Kommunikationsinfrastrukturen und des immer stärker digitalisierten/vernetzten Energiesystems insgesamt vor cybertechnischen Angriffen sowie der Datenschutz. Diese werden erst in Weiterentwicklung des Programms vom BMWi als relevantes Thema der Forschungsförderung genannt. Die Analyse der breiteren wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Implikationen der Digitalisierung (Automatisierung) und deren Bedeutung für die Entwicklung des Energiesystems ist bislang hingegen nicht im sechsten EFP als Forschungsthema enthalten.

### *Geschäftsmodelle*

Wie beschrieben stellt die Digitalisierung darüber hinaus einen zentralen Treiber für das Aufbrechen bestehender und die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle dar. Auch wenn Ziel des sechsten EFPs die Förderung von Innovationen auf allen Entwicklungsstufen bis hin zur Anwendung ist, werden Geschäftsmodelle und ihre Voraussetzungen generell und nicht nur im Zusammenhang mit Informations- und Kommunikationstechnologien/der Digitalisierung wenig berücksichtigt. Dies gilt auch für die Aktualisierung des Programmteils des BMWi zur zweiten Förderphase [103]. Hervorgehoben wird, allerdings ohne expliziten Verweis auf das Sammeln von Erfahrungen zu und die Analyse der Tragfähigkeit neuer Geschäftskonzepte, die Bedeutung der konkreten Anwendung von neuen technologischen Lösungen in Pilotprojekten, etwa im Bereich der Energieeffizienz in den ressort-übergreifenden Förderinitiativen EnEff:Stadt und EnEff:Wärme, sowie die Bedeutung der Einbindung von Partnern aus der Praxis für die spätere Marktverbreitung von Technologien. Im Programmteil des BMBFs wird darüber hinaus auch im Handlungsfeld „Umsetzung von Grundlagenwissen in technologische Lösungen“ auf bestehende Probleme bei der kommerziellen Umsetzung erfolgsversprechender For-

schungsergebnisse verwiesen: Diese sollen durch Schaffung von – allerdings nicht näher ausgeführten – Anreizen, „Grundlagenergebnisse kontinuierlich im Kontext des Energiesystems zu bewerten und zu ordnen sowie mit den Bedarfsträgern abzustimmen“, ([102], S. 110) abgebaut werden.

### *Akzeptanz*

Das sechste EFP räumt grundsätzlich der sozialen Akzeptanz hohe Bedeutung für den Umbau des Energieversorgungssystems ein. Meist wird unter Verweis auf die notwendige soziale Akzeptanz die Förderung weiterer Technologieentwicklung motiviert, indem durch diese die Kosten oder die Umweltauswirkungen innovativer bzw. klimafreundlicher Energietechnologien reduziert werden sollen. Dies gilt etwa mit Blick auf innovative Netztechnologien ([102], S. 49), die umwelt- und naturverträgliche Produktion von Biomasse zur Bioenergieerzeugung ([102], S. 100), oder generell in Bezug auf die Förderung einzelner Energietechnologien im Programmteil des BMU. Über das sechste EFP werden jedoch auch begleitende Akzeptanzuntersuchungen zu technologischen FuE-Vorhaben gefördert, sowohl über den Programmteil des BMWi als auch den des BMU. Adressiert werden Fragen der sozialen Akzeptanz und insgesamt sozialwissenschaftliche Forschungsergebnisse zudem im Förderschwerpunkt Systemanalyse, bei dem eine stärkere Einbindung sozialwissenschaftlicher Forschungsergebnisse in die Systemanalyse, insbesondere von „gesellschaftliche[n] Aspekte[n] im Zusammenhang mit der Akzeptanzforschung“ zum Verständnis von Akzeptanzvorgängen angestrebt wird („EnSys – Systemanalyse in der Energieforschung“ in [102], S. 63, sowie im BMBF-Programmteil, S. 118). Als eigenständiges Forschungsthema finden sozio-ökonomische Fragenstellungen und Fragen der Akzeptanz primär im Programmteil des BMBF Berücksichtigung. Insbesondere wird an dieser Stelle auch der hier vertretenen Position Rechnung getragen, nach der eine zu starke Technologie-Fokussierung der „Wechselwirkung von Mensch und Technik nicht gerecht wird und den Akzeptanzaspekt bei der Umsetzung neuer Technologien nicht hinreichend würdigt“ ([102], S. 107). In diesem Zusammenhang wird auch das Problem fehlender Marktakzeptanz innovativer Technologien adressiert und deren Ursachen und Faktoren als Förderthema des BMBFs definiert (vgl. [102], S. 119). Als Thema der Forschungsförderung werden an dieser Stelle schließlich auch die Entwicklung von Dialog- und Partizipationsverfahren mit Hilfe (sozial-)wissenschaftlicher Expertise erfasst. Im Zuge der Fortentwicklung des Programmteils zur zweiten Förderphase trägt das BMWi der sozialen Akzeptanz und einer generell stärkeren Einbindung der Sozial- und Geisteswissenschaften ebenfalls verstärkt Rechnung, indem in der Darstellung deswendungszwecks explizit interdisziplinäre Forschungsansätze und eine zumindest begleitende Einbindung sozialwissenschaftlicher Expertisen gefordert und gefördert wird [103].

### *Nachfrageverhalten – Energieeffizienz und Nachfrageflexibilität*

Energieeffizienz und kurzfristige Nachfrageflexibilität fallen ebenfalls unter die im Rahmen des sechsten EFPs geförderten Themen. Allerdings zeigt sich auch hier ein starker Fokus auf die Neu- und Weiterentwicklung entsprechender Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz und zur stärkeren Steuerung der Energienachfrage. Dennoch wird im sechsten EFP allgemein festgestellt, dass sozio-ökonomische Faktoren, d.h. nicht-technische Voraussetzungen, starken Einfluss auf die Energienachfrage haben und lokale und kulturelle Voraussetzungen etwa bei der energieeffizienten Gestaltung von Städten und Wohnquartieren Beachtung finden müssen. Im Zusammenhang mit der Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebereich wird durch das BMWi zudem darauf verwiesen, dass innovative Energieeffizienztechnologien nur Verbreitung finden, wenn sie von Investoren und Mietern akzeptiert werden ([102], S. 34). Insgesamt spielen gleichwohl nicht-technische Umsetzungshemmnisse wie insbesondere die verschiedenen verhaltensökonomischen Erklärungsansätze für scheinbar irrationales Energieverbrauchsverhalten sowie die Analyse und Gestaltung entsprechender regulatorischer Voraussetzungen aber eine deutlich untergeordnete Rolle bzw. sind im sechsten EFP nicht explizit enthalten. Eine Ausnahme stellt hier der Programmteil des BMBF dar, in dem die Analyse regulatorischer und informatorischer Maßnahmen sowie allgemein die Entwicklung von Anreizen zur Steigerung der Energieeffizienz unter Vermeidung von Rebound-Effekten als förderfähige Themen der Energieforschung angeführt werden ([102], S. 111). Zumindest im Verkehrsbereich wird zudem darauf hingewiesen, dass Verhaltensänderungen grundsätzlich erhebliche Einsparpotentiale eröffnen könnten ([102], S. 112), während jedoch im Bereich der Nachfragesteuerung (Demand Response) insgesamt das Ziel ausgegeben wird, „die Bürgerinnen und Bürger in ihren Verbrauchsgewohnheiten nicht [einzuschränken]“ ([102], S. 114).

### *Flexibilitätsoptionen, Sektorkopplung, Energiesystemanalyse*

Einzelne Flexibilitätsoptionen wie insbesondere Energiespeicher und die Weiterentwicklung der Stromnetze hin zu intelligenten Netzen werden im sechsten EFP bereits ausführlich über zwei ressortübergreifende Förderinitiativen („Förderinitiative Energiespeicher“, „Förderinitiative Netz“) adressiert. Bei Energiespeichern liegt dabei ein starker Fokus auf der technologischen Weiterentwicklung der verschiedenen Speichertechnologien und deren Anpassung an fluktuierende erneuerbare Energien (z.B. flexible Elektrolyseure), an die Bündelung kleiner dezentraler Speicher zu virtuellen Großspeichern (vgl. auch oben Digitalisierung), insbesondere aber auch auf der Kostenreduktion durch Senkung der Investitionskosten und Verlängerung der Lebensdauern (vgl. in [102] BMWi-Teil, S. 44 ff., BMU-Teil, S. 94 und in [103] Abschnitt 3.8). Bei den Energienetzen liegen die Schwerpunkte der Forschungsförderung neben der Komponentenentwicklung auf den technischen Herausforderungen der Integration fluktuierender erneuerbarer

Energien, denen insbesondere durch eine Steigerung der Intelligenz der Netze durch Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien, wie bereits zuvor im Zusammenhang mit den Digitalisierungs-Themen ausgeführt, begegnet werden soll. Im Gegensatz zu ihrer hervorgehobenen Bedeutung in diesem Kapitel wird dagegen die Sektorkopplung nicht als eigenständiger Förderschwerpunkt im sechsten EFP erfasst. Förderfähig sind jedoch einzelne Ansätze bzw. Elemente der Sektorkopplung wie die Kopplung von Strom- und Verkehrssektor über die intelligente Integration von Elektrofahrzeugen in das Stromnetz zur Erbringung von Systemdienstleistungen ([102], S. 95 oder Abschnitt 3.13 [103]). Im Vergleich zu den anderen sektorübergreifenden Themen dieses Kapitels nimmt die Systemanalyse großen Raum im sechsten EFP ein. Zur Weiterentwicklung bzw. Bewältigung methodischer Herausforderungen und zur Unterstützung der Erarbeitung und Bewertung von Energieszenarien und Technologiepotentialen mit Hilfe der Energiesystemanalyse legt das BMWi sogar einen eigenständigen Förderschwerpunkt „EnSys – Systemanalyse in der Energieforschung“ auf ([102], S. 63 und Abschnitt 3.14 in [103]). Auch das BMBF fördert entsprechende Vorhaben (vgl. [102], S. 118). Beide Ressorts führen dabei auch die stärkere Einbeziehung „gesellschaftlicher Aspekte im Zusammenhang mit der Akzeptanzforschung“ ([102], S. 63) bzw. „soziokultureller Rahmenbedingungen“ ([102], S. 118) als Ziel der Förderung an. Mit der Abstimmung zwischen den verschiedenen Flexibilitätsoptionen, der Ausweitung von Lebenszyklus- und Multi-Kriterien-Analysen weist der in Kapitel 2.5 identifizierte Forschungsbedarf jedoch in manchen Aspekten noch über das sechste EFP hinaus.

### *Regulatorischer Rahmen*

Das sechste EFP adressiert die angesprochenen, breiten regulatorischen Herausforderungen und Forschungsfragen, die sich im Zuge des weiteren Umbaus des Versorgungssystems stellen, bislang nur vereinzelt und teilweise auch nur indirekt. So „soll die technologieübergreifende Kopplung von weitestgehend entwickelten Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem im Vordergrund stehen (vgl. Anwendungszweck in [103]). Die Rolle der Informations- und Kommunikationstechnologien, Fragen der Systemicherheit und Systemzuverlässigkeit sowie der Akzeptanz werden genannt. Die Überprüfung des regulatorischen Rahmens im Kontext „zukunftsfähiger Energienetze“, die Notwendigkeit der Systemintegration erneuerbarer Energien und die Frage der Einbindung auch von virtuellen Kraftwerken bei Systemdienstleistungen und am Regelleistungsmarkt werden aufgeworfen. Im Programmteil des BMU (in [102]) werden ebenfalls systemische Fragen zur Integration erneuerbarer Energien in das Energieversorgungssystem adressiert, auch wenn die regulatorischen Rahmenbedingungen fast ausschließlich indirekt aufscheinen. Allerdings findet sich ein Absatz zur Querschnittsforschung für die Rahmenbedingungen für einen hohen Anteil erneuerbarer Energien, in dem auf die notwendigen ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen in einem optimierten Gesamtsystem hingewiesen wird (Abschnitt 4.8 in [103]).

Die auch etwa im BMWi Programmteil dargelegte Rolle der Systemanalyse zur Generierung von umfangreichem und detailliertem Orientierungswissen wird im BMBF Programmteil mit dem Verweis auf die wissensbasierte Systemanalysen aufgegriffen. Dort wird ausdrücklich auf das Zusammenwirken von technologischen, wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und regulatorischen Aspekten im Energiesystem hingewiesen und die Einbeziehung dieser Rahmenbedingungen jenseits der technologischen Entwicklungen gefordert (vgl. [102], S. 118). Zusammenfassend lässt sich aber feststellen, dass politische Rahmenbedingungen eine eher untergeordnete Rolle im sechsten EFP spielen.

## Literaturangaben

- [1] Zipp, A.: Markt-und Systemintegration von erneuerbaren Energien im Rahmen der Systemtransformation–Ein Beitrag zur definitorischen Abgrenzung. Zeitschrift für Energiewirtschaft 40 (2016) 4, S. 233–243
- [2] Energiewende und Dezentralität. Zu den Grundlagen einer politisierten Debatte., Agora Energiewende, 2017
- [3] Aspekte der Energiewende aus sozialwissenschaftlicher Perspektive. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, Renn, O., München 2015
- [4] Die Digitale Energiewirtschaft. Agenda für Unternehmen und Politik, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin 2016
- [5] Doleski, O. D.: Herausforderung Utility 4.0: Wie sich die Energiewirtschaft im Zeitalter der Digitalisierung verändert. Springer Vieweg 2017
- [6] Digitalisierung in der Energiewirtschaft. Bedeutung, Treiber und Handlungsempfehlungen für die IT-Architektur in den Unternehmen, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin 2015
- [7] Geschäftsmodelle 2020. Wie in der Energiewirtschaft zukünftig noch Geld verdient werden kann, Ernst & Young, 2016
- [8] Industrie 4.0 und Digitale Wirtschaft. Impulse für Wachstum, Beschäftigung und Innovation, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin 2015
- [9] Stellungnahme zum fünften Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2015, Löschel, A., Erdmann, G., Staiß, F. u. Ziesing, H. J., Berlin, Münster, Stuttgart 2016
- [10] Hans Christian Gils: Economic potential for future demand response in Germany – Modeling approach and case study. Applied Energy 162 (2016), S. 401–415
- [11] Haider, H. T., See, O. H. u. Elmenreich, W.: A review of residential demand response of smart grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews 59 (2016), S. 166–178
- [12] Loßner, M., Böttger, D. u. Bruckner, T.: Economic assessment of virtual power plants in the German energy market — A scenario-based and model-supported analysis. Energy Economics 62 (2017), S. 125–138
- [13] Energie für Deutschland. Fakten, Perspektiven und Positionen im globalen Kontext 2017, Weltenergierat, Berlin 2017

- [14] Blockchain in der Energiewende - Eine Umfrage unter Führungskräften der deutschen Energiewirtschaft, Burger, C., Kuhlmann, A., Richard, P. u. Weinmann, J., Berlin 2016
- [15] Together Secure Sustainable Digitalization & Energy, International Energie Agentur, Paris 2017
- [16] Peters, P. u. Mohr, N.: Digitalisierung im Energiemarkt: Neue Chancen, neue Herausforderungen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 65 (2015) 12, S. 8–12
- [17] Trommer, S., Kolarova, V., Frädrieh, E., Kröger, L., Kickhöfer, B., Kuhnimhof, T., Lenz, B. u. Phleps, P.: Autonomous Driving-The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour (2016)
- [18] Heß, A. u. Polst, S.: Mobilität und Digitalisierung: Vier Zukunftsszenarien (2017)
- [19] Gelenbe, E. u. Caseau, Y.: The impact of information technology on energy consumption and carbon emissions. *Ubiquity* 2015 (2015) June, S. 1
- [20] Monitoringbericht 2017, Bundesnetzagentur, Bonn 2017
- [21] Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr, Gerhardt, N., Sandau, F., Scholz, A., Hahn, H., Schumacher, P., Sager, C., Bergk, F., Kämper, C., Knörr, W. u. Kräck, J., Kassel 2015
- [22] Onyeji, I., Bazilian, M. u. Bronk, C.: Cyber Security and Critical Energy Infrastructure. *The Electricity Journal* 27 (2014) 2, S. 52–60
- [23] Das Smart-Meter-Gateway. Sicherheit für intelligente Netze, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Bonn 2015
- [24] Feuerriegel, S., Bodenbenner, P. u. Neumann, D.: Value and granularity of ICT and smart meter data in demand response systems. *Energy Economics* 54 (2016), S. 1–10
- [25] Zhang, Y., Yang, R., Zhang, J., Weng, Y. u. Hodge, B.-M.: Chapter 16 - Predictive Analytics for Comprehensive Energy Systems State Estimation A2 - Arghandeh, Reza. In: T1 - Chapter 16 - Predictive Analytics for Comprehensive Energy Systems State Estimation A2 - Arghandeh, Reza u. Zhou, Y. (Hrsg.): *Big Data Application in Power Systems*. Elsevier 2018, S. 343–376
- [26] Jadhav, V. u. Ligay, V.: *Forecasting Energy Consumption using Machine Learning*. 2016
- [27] Gholamzadeh Nabati, E. u. Thoben, K.-D.: *Big Data Analytics in the Maintenance of Off-Shore Wind Turbines: A Study on Data Characteristics*. 2017
- [28] *Energieeffizienz als Geschäftsmodell*. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, ifeu u. LBD, 2014

- [29] Abschlussbericht Dialog Energiewende und Industriepolitik. Erstellt im Auftrag von Agora Energiewende, Roland Berger, Berlin 2017
- [30] Transdisziplinäre Lösungen - Reifegrade und Wirkungskategorien. Wissenschaftliches Begleitvorhaben "Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement", Schön, S., Eismann, C., Ansmann, T. u. Wendt-Schwarzburg, H., Berlin 2016
- [31] Aichele, C. u. Doleski, O. D.: Smart market. Vom Smart Grid zum Intelligenten Energiemarkt. Springer Vieweg 2014
- [32] Untersuchung des Markts für Energieaudits, Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen. Projekt 06/15, Bundesstelle für Energieeffizienz, Eschborn 2017
- [33] Analyse des Gründungsgeschehens in Deutschland. Mit Vorschlägen zur Verbesserung der Gründungsbedingungen, Pinkwart, A., Leipzig 2016
- [34] Global Entrepreneurship Monitor. Global Report 2017/18, Global Entrepreneurship Research Association, 2018
- [35] Wüstenhagen, R., Wolsink, M. u. Bürer, M. J.: Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy* 35 (2007) 5, S. 2683–2691
- [36] Die gesellschaftliche Wahrnehmung der Energiewende: Ergebnisse einer deutschlandweiten Repräsentativbefragung. *Stuttgarter Beiträge zur Risiko- und Nachhaltigkeitsforschung* Nr. 34, Sonnberger, M. u. Ruddat, M., Stuttgart 2016
- [37] Bertsch, V., Hall, M., Weinhardt, C. u. Fichtner, W.: Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany. *Energy* 114 (2016) Supplement C, S. 465–477
- [38] Black Swans (Risiken) in der Energiewende. Risikomanagement für die Energiewende, prognos, ewi u. GWS, Basel 2016
- [39] Schumann, D., Fischer, W. u. Hake, J.-F.: Bewertung der Energiewende und Energiepolitik in der Bevölkerung. *Energiawirtschaftliche Tagesfragen* 67 (2017) 6, S. 77–81
- [40] Schubert, D. K. J., Meyer, T. u. Möst, D.: Die Transformation des deutschen Energiesystems aus der Perspektive der Bevölkerung. *Zeitschrift für Energiwirtschaft* 39 (2015) 1, S. 49–61
- [41] Yang, Y., Solgaard, H. S. u. Haider, W.: Wind, hydro or mixed renewable energy source: Preference for electricity products when the share of renewable energy increases. *Energy Policy* 97 (2016), S. 521–531

- [42] Andor, M., Frondel, M., Guseva, M. u. Sommer, S.: Zahlungsbereitschaft für grünen Strom: Zunehmende Kluft zwischen Wunsch und Wirklichkeit. *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 40 (2016) 4, S. 199–209
- [43] Beyer, G., Borchers, D., Frondel, M., Hrach, M., Kutzschbauch, O., Menges, R., Sommer, S. u. Traub, S.: Die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende: Befunde eines interdisziplinären Forschungsprojektes. *RWI Materialien* 116 (2017)
- [44] *Energiewende 2030: The Big Picture. Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende*, Agora Energiewende, Berlin 2017
- [45] Devine-Wright, P., Batel, S., Aas, O., Sovacool, B., Labelle, M. C. u. Ruud, A.: A conceptual framework for understanding the social acceptance of energy infrastructure: Insights from energy storage. *Energy Policy* 107 (2017) Supplement C, S. 27–31
- [46] Kühne, O. u. Weber, F.: Zur sozialen Akzeptanz der Energiewende. *uwf Umwelt-WirtschaftsForum* 24 (2016) 2, S. 207–213
- [47] Sütterlin, B. u. Siegrist, M.: Public acceptance of renewable energy technologies from an abstract versus concrete perspective and the positive imagery of solar power. *Energy Policy* 106 (2017), S. 356–366
- [48] Hildebrand, J., Rau, I. u. Schweizer-Ries, P.: Akzeptanz und Beteiligung – ein ungleiches Paar. In: Holstenkamp, L. u. Radtke, J. (Hrsg.): *Handbuch Energiewende und Partizipation*. Wiesbaden: Springer 2018, S. 195–209
- [49] Schippl, J., Grunwald, A. u. Renn, O. (Hrsg.): *Die Energiewende verstehen - orientieren - gestalten: Erkenntnisse aus der Helmholtz-Allianz ENERGY-TRANS*. Baden-Baden: Nomos 2017
- [50] Renn, O., Köck, W., Schweizer, P.-J., Bovet, J., Benighaus, C., Scheel, O. u. Schröter, R.: Öffentlichkeitsbeteiligung bei Planungsvorhaben der Energiewende. In: Schippl, J., Grunwald, A. u. Renn, O. (Hrsg.): *Die Energiewende verstehen - orientieren - gestalten: Erkenntnisse aus der Helmholtz-Allianz ENERGY-TRANS*. Baden-Baden: Nomos 2017, S. 547–568
- [51] Cohen, J. J., Reichl, J. u. Schmidthaler, M.: Re-focussing research efforts on the public acceptance of energy infrastructure: A critical review. *Energy* 76 (2014) Supplement C, S. 4–9
- [52] Schubert, D. K. J., Thuß, S. u. Möst, D.: Does political and social feasibility matter in energy scenarios? *Energy Research & Social Science* 7 (2015) Supplement C, S. 43–54

- [53] Halstrup, D. u. Schriever, M.: Zur Akzeptanz von Stromspeichern in Unternehmen. *Zeitschrift für Energiewirtschaft* (2017), S. 1–8
- [54] Dokumentation zur Innovationserhebung 2014: Innovationen mit Bezug zur Energiewende, Finanzierung von Innovationen. ZEW-Dokumentation Nr. 15-02, Rammer, C. u. Peters, B., 2015
- [55] acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V.: *Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende*. Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung. 2017
- [56] *Energiesparen durch verhaltens-ökonomisch motivierte Maßnahmen – Ein systematischer Literaturüberblick zur Stellungnahme „Verbraucherpolitik für die Energiewende“*. Schriftenreihe *Energiesysteme der Zukunft*, Andor, M. A. u. Fels, K. M., 2017
- [57] Sachverständigenrat für Umweltfragen: *Umweltgutachten 2016. Impulse für eine integrative Umweltpolitik*. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG 2016
- [58] Schulte, I. u. Heindl, P.: Price and income elasticities of residential energy demand in Germany. *Energy Policy* 102 (2017), S. 512–528
- [59] Bernstein, R. u. Madlener, R.: Short- and long-run electricity demand elasticities at the subsectoral level: A cointegration analysis for German manufacturing industries. *Energy Economics* 48 (2015) Supplement C, S. 178–187
- [60] Labandeira, X., Labeaga, J. M. u. López-Otero, X.: A meta-analysis on the price elasticity of energy demand. *Energy Policy* 102 (2017), S. 549–568
- [61] O’Connell, N., Pinson, P., Madsen, H. u. O’Malley, M.: Benefits and challenges of electrical demand response: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014), S. 686–699
- [62] Ramos, A., Gago, A., Labandeira, X. u. Linares, P.: The role of information for energy efficiency in the residential sector. *Energy Economics* 52 (2015) Supplement 1, S. S17-S29
- [63] Matthies, E.: Nutzerverhalten im Energiesystem. Erkenntnisse und Forschungsfragen aus der Psychologie. In: Schippl, J., Grunwald, A. u. Renn, O. (Hrsg.): *Die Energiewende verstehen - orientieren - gestalten: Erkenntnisse aus der Helmholtz-Allianz ENERGY-TRANS*. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG 2017, S. 201–212
- [64] Kholodilin, K., Mense, A. u. Michelsen, C.: Marktwert der Energieeffizienz: Deutliche Unterschiede zwischen Miet- und Eigentumswohnungen. *DIW-Wochenbericht* 83 (2016) 28, S. 605–613

- [65] acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V.: Verbraucherpolitik für die Energiewende. Stellungnahme. Berlin 2017
- [66] Häckel, B., Pfosser, S. u. Tränkler, T.: Explaining the energy efficiency gap - Expected Utility Theory versus Cumulative Prospect Theory. *Energy Policy* 111 (2017), S. 414–426
- [67] Gerarden, T. D., Newell, R. G. u. Stavins, R. N.: Assessing the Energy-Efficiency Gap. *Journal of Economic Literature* 55 (2017) 4, S. 1486–1525
- [68] Gillingham, K. u. Palmer, K.: Bridging the Energy Efficiency Gap: Policy Insights from Economic Theory and Empirical Evidence. *Review of Environmental Economics and Policy* 8 (2014) 1, S. 18–38
- [69] Stadelmann, M.: Mind the gap? Critically reviewing the energy efficiency gap with empirical evidence. *Energy Research & Social Science* 27 (2017), S. 117–128
- [70] Matthies, E., Bobeth, S., Klöckner, C. u. Schippl, J.: Zur besseren Verbreitung von Elektroautos – Was können wir in Deutschland von Norwegen lernen? In: Schippl, J., Grunwald, A. u. Renn, O. (Hrsg.): *Die Energiewende verstehen - orientieren - gestalten: Erkenntnisse aus der Helmholtz-Allianz ENERGY-TRANS*. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG 2017, S. 531–546
- [71] DeShazo, J. R.: Improving Incentives for Clean Vehicle Purchases in the United States: Challenges and Opportunities. *Review of Environmental Economics and Policy* 10 (2016) 1, S. 149–165
- [72] Sheldon, T. L. u. DeShazo, J. R.: How does the presence of HOV lanes affect plug-in electric vehicle adoption in California? A generalized propensity score approach. *Journal of Environmental Economics and Management* 85 (2017), S. 146–170
- [73] Allcott, H., Knittel, C. u. Taubinsky, D.: Tagging and targeting of energy efficiency subsidies. *The American Economic Review* 105 (2015) 5, S. 187–191
- [74] Allcott, H.: Paternalism and Energy Efficiency: An Overview. *Annual Review of Economics* 8 (2016) 1, S. 145–176
- [75] Newell, R. G. u. Siikamäki, J.: Individual time preferences and energy efficiency. *The American Economic Review* 105 (2015) 5, S. 196–200
- [76] Fowlie, M., Greenstone, M. u. Wolfram, C.: Are the non-monetary costs of energy efficiency investments large? Understanding low take-up of a free energy efficiency program. *The American Economic Review: Papers & Proceedings* 105 (2015) 5, S. 201–204

- [77] Vögele, S., Matthies, E., Kastner, I., Buchgeister, I., Kleemann, M., Ohlhorst, D. u. Nast, M.: Reduktion des gebäuderelevanten Energiebedarfs als Herausforderung für die Energiewende: Sechs Thesen zu unterschätzten Barrieren und Potenzialen. In: Schippl, J., Grunwald, A. u. Renn, O. (Hrsg.): Die Energiewende verstehen - orientieren - gestalten: Erkenntnisse aus der Helmholtz-Allianz ENERGY-TRANS. Baden-Baden: Nomos 2017, S. 513–530
- [78] Gillingham, K., Rapson, D. u. Wagner, G.: The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy. *Review of Environmental Economics and Policy* 10 (2016) 1, S. 68–88
- [79] Achtnicht, M.: The Effect of Building Energy Retrofits on Daily Heating Time. *Economics Bulletin* 36 (2016) 2, S. 1128–1135
- [80] Aydin, E., Kok, N. u. Brounen, D.: Energy efficiency and household behavior: the rebound effect in the residential sector. *RAND Journal of Economics* 48 (2017) 3, S. 749–782
- [81] Fowlie, M., Greenstone, M. u. Wolfram, C.: Do energy efficiency investments deliver? Evidence from the weatherization assistance program. NBER Working Paper 21331 (2015)
- [82] Boomhower, J. P. u. Davis, L. W.: Do energy efficiency investments deliver at the right time? NBER Working Paper 23097 (2017)
- [83] Efficiency First: Wie sieht ein effizientes Energiesystem in Zeiten der Sektorkopplung aus?, Agora Energiewende, 2017
- [84] Löschel, A. u. Werthschulte, M.: Smart Energy zur Flexibilisierung und Senkung des Energieverbrauchs—Handlungsoptionen und offene Fragen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 67 (2017) 8, 19–23
- [85] Nolan, S. u. O'Malley, M.: Challenges and barriers to demand response deployment and evaluation. *Applied Energy* 152 (2015), S. 1–10
- [86] Broberg, T. u. Persson, L.: Is our everyday comfort for sale? Preferences for demand management on the electricity market. *Energy Economics* 54 (2016) Supplement C, S. 24–32
- [87] Olsthoorn, M., Schleich, J. u. Klobasa, M.: Barriers to electricity load shift in companies: A survey-based exploration of the end-user perspective. *Energy Policy* 76 (2015), S. 32–42
- [88] Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 -Hauptbericht, Pellingner, C. u. Schmid, T., München 2016
- [89] Technologien für die Energiewende: Status und Perspektiven, Innovations- und Marktpotenziale - eine multikriterielle vergleichende Technologieanalyse und -

Bewertung. Teilprojekt A im Rahmen des strategischen BMWi-Leitprojekts "Trends für die Energieforschung", Wuppertal Institut, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, IZES gGmbH

- [90] 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., Pfenning, M., Gerhardt, N., Pape, C. u. Böttger, D., Kassel 2017
- [91] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: MONA 2030: Bewertung Netzoptimierender Maßnahmen gemäß technischer, ökonomischer, ökologischer, gesellschaftlicher und rechtlicher Kriterien. Abschlussbericht Einsatzreihenfolgen. München 2017
- [92] Santarius, T.: Der Rebound-Effekt. Ökonomische, psychische und soziale Herausforderungen für die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch. Wirtschaftswissenschaftliche Nachhaltigkeitsforschung, Bd. 18. Metropolis Verlag für Ökonomie, Gesellschaft und Politik GmbH 2015
- [93] Schweizer, V. J. u. O'Neill, B. C.: Systematic construction of global socioeconomic pathways using internally consistent element combinations. *Climatic Change* 122 (2014) 3, S. 431–445
- [94] Energie 2017: Gezielt vorgehen, Stückwerk vermeiden. Sondergutachten 77 der Monopolkommission gemäß §62 EnWG, Monopolkommission, 2017
- [95] May, N. u. Neuhoff, K.: Financing Power: Impacts of Energy Policies in Changing Regulatory Environments. *DIW Discussion Papers* 1684 (2017)
- [96] Löschel, A., Flues, F., Pothén, F. u. Massier, P.: Der deutsche Strommarkt im Umbruch: zur Notwendigkeit einer Marktordnung aus einem Guss. *Wirtschaftsdienst* 93 (2013) 11, S. 778–784
- [97] Smart Market Design im deutschen Verteilnetz. Entwicklung und Bewertung von Smart Markets und Ableitung einer Regulatory Roadmap. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Ecofys u. Fraunhofer IWES, 2017
- [98] Neue Preismodelle für Energie. Grundlagen einer Reform der Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom und fossile Energieträger, Agora Energiewende, Berlin 2017
- [99] "Sektorkopplung" - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, Ausfelder, F., Drake, F.-D., Erlach, B., Fishedick, M., Henning, H.-M., Kost, C., Münch, W., Pittel, K., Rehtanz, C., Sauer, J., Schätzler, K., Stephanos, C., Wagner, H.-J. u. Wagner, U., München 2017

- [100] Kosten und Nutzen einer Dynamisierung von Strompreiskomponenten als Mittel zur Flexibilisierung der Nachfrage. Bericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Frontier economics u. BET, 2016
- [101] Rosen, C. u. Madlener, R.: Regulatory Options for Local Reserve Energy Markets: Implications for Prosumers, Utilities, and other Stakeholders. *The Electricity Journal* 37 S12 (2016), S. 39–50
- [102] Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin 2011
- [103] Bekanntmachung Forschungsförderung im 6. Energieforschungsprogramm "Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung", Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2014