

# Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland

Modul 10.a: Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 % bis 2050  
Grundsätzliche Überlegungen zu Optionen und Hemmnissen  
Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie





## AutorInnen/Reviewer

---

**AutorInnen:** Benjamin Pfluger, Tobias Fleiter, Lukas Kranzl, Michael Hartner, Wolfgang Schade, Anna Hennecke, Horst Fehrenbach, Lars Brischke, Bernd Tersteegen, Frank Sensfuß, Jan Steinbach

**Reviewer:** Christoph Maurer, Bernd Franke, Mario Ragwitz, Martin Pehnt, Martin Wietschel

## Impressum

---

Benjamin Pfluger	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) Breslauer Straße 48   76139 Karlsruhe <a href="mailto:Benjamin.Pfluger@isi.fraunhofer.de">Benjamin.Pfluger@isi.fraunhofer.de</a>
Bernd Tersteegen	Consentec GmbH Grüner Weg 1   52070 Aachen <a href="mailto:tersteegen@consentec.de">tersteegen@consentec.de</a>
Bernd Franke	ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH Wilckensstraße 3   D-69120 Heidelberg, Deutschland <a href="mailto:bernd.franke@ifeu.de">bernd.franke@ifeu.de</a>
Hintergrundbild Deckblatt	© shutterstock.com/vs148
Veröffentlicht	Mai 2017



---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Hintergrund .....	1
1.2	Was bedeutet „Vollständige Dekarbonisierung“?.....	4
1.3	Bis wann soll die vollständige Dekarbonisierung gelingen? .....	7
2	Rahmenbedingungen der Dekarbonisierung.....	10
2.1	Welche klimapolitischen Ziele verfolgen Europa und der Rest der Welt? .....	10
2.2	Welche Rolle können Suffizienzmaßnahmen spielen? .....	12
2.3	Steht CCS als Option zu Verfügung? .....	14
2.4	Welche CO <sub>2</sub> -Senken können und sollen erschlossen werden? .....	16
2.4.1	Biomasse-CCS .....	17
2.4.2	CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus der Luft.....	19
2.4.3	Weitere Ansätze des Geoengineering? .....	20
2.5	Wie kann der Mix der Energieträger gestaltet werden? .....	20
2.5.1	Wie viel Biomasse steht Deutschland zu Verfügung?.....	22
2.5.2	Sollen bzw. müssen aus Strom sekundäre Energieträger erzeugt werden? .....	25
2.5.3	Potentialabschätzung EE-Methan .....	28
2.6	Wie hoch muss der CO <sub>2</sub> -Preis sein? .....	32
2.7	Strategiewahl als Frage der Akzeptanz und des gesellschaftlichen Konsenses .....	33
3	Energetische Emissionen .....	35
4	Verkehrssektor .....	38
4.1	Status quo.....	38

---

4.2	Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands.....	40
4.3	Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands.....	41
4.3.1	PKW und leichte Nutzfahrzeuge bis 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht.....	43
4.3.2	Nutzfahrzeuge ab 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht - LKW.....	45
4.3.3	Busse .....	46
4.3.4	Luft- und Schiffsverkehr.....	46
4.3.5	Priorisierung der technischen Lösungen der Verkehrsträger ....	47
4.3.6	Die Rolle des Modal-shift und die Rolle der Bahn.....	48
4.3.7	Sektorkopplung des Verkehrs in einer vollständigen Dekarbonisierung .....	49
4.4	Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95%-Welt.....	51
5	Umwandlungssektor.....	56
5.1	Status quo .....	56
5.2	Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands.....	57
5.3	Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands.....	60
5.3.1	Wie viel Strom aus Erneuerbaren Energien kann Deutschland erzeugen? .....	60
5.3.2	Wie kann Strom aus Erneuerbaren Energien integriert werden? .....	63
5.3.3	Welche Rolle können Stromspeicher spielen und wie kann die Fernwärme dekarbonisiert werden?.....	63
5.4	Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95%-Welt.....	65
6	Industriesektor.....	68

---

6.1	Status quo.....	68
6.2	Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands .....	70
6.3	Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands .....	72
6.4	Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95-%-Welt .....	76
7	Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung.....	80
7.1	Status quo.....	80
7.2	Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands .....	82
7.3	Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands .....	85
7.4	Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95-%-Welt .....	88
8	Nichtenergetische Emissionen.....	91
8.1	Landwirtschaft.....	92
8.1.1	Status quo.....	92
8.1.2	Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands .....	93
8.1.3	Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands .....	94
8.1.4	Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95- %-Welt .....	95
8.2	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) .....	96
8.2.1	Status quo.....	96
8.2.2	Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands .....	97
8.2.3	Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands .....	97

---

8.2.4	Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95- %-Welt.....	98
9	Zentrale Schlussfolgerung.....	99
10	Notwendige Maßnahmen .....	102
11	Literatur.....	105



---

## Abkürzungsverzeichnis

BECCS	Bioenergy with CCS
CCS	Carbon capture and storage (CO <sub>2</sub> -Abscheidung und Speicherung)
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DB	Deutsche Bahn
EE	Erneuerbare Energien
EnEG	Energieeinsparungsgesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
EU	Europäische Union
EU ETS	European Union Emission Trading Scheme
F&E	Forschung und Entwicklung
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GW	Gigawatt
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> -BZ	Wasserstoffbrennstoffzellen
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LKW	Lastkraftwagen
INFz	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquefied natural gas (Flüssigerdgas)
LULUCF	Land use, land-use change, and forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)
MWh	Megawattstunde
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PKW	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PV	Photovoltaik
TEN-V	Transeuropäische Verkehrsnetze
THG	Treibhausgas
TWh	Terawattstunde



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Die Begrenzung des von Menschen verursachten Klimawandels zählt zu den zentralen umweltpolitischen Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Sie erfordert eine massive Minderung der Treibhausgasemissionen. Diese entstehen bei der Nutzung fossiler Energieträger, aber auch durch andere Aspekte des Lebens und Wirtschaftens, wie der Nahrungsmittelproduktion oder in manchen Industrieprozessen.

Seit Beginn der weltweiten Klimaverhandlungen und der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls ist die langfristige Dekarbonisierung der Wirtschaftssysteme in den Industrieländern ein zentrales Entwicklungsziel. Dieses Ziel wurde in den Beschlüssen von Paris durch die Übereinkunft zum Ziel, die Klimaerwärmung möglichst auf maximal 1,5°C zu begrenzen, noch einmal bekräftigt

Im Energiekonzept der Bundesregierung wurde bereits im Jahr 2010 ein Pfad für die zukünftige Reduktion der Treibhausgasemissionen vorgegeben. Da sich die Zielvorgaben nicht explizit auf einen bestimmten Bereich der Treibhausgasemissionen beziehen, beispielsweise auf die energiebedingten Emissionen, ist davon auszugehen, dass sie sich auf die gesamten Treibhausgasemissionen beziehen.<sup>1</sup> Es sollen

*„[...] bis 2020 die Treibhausgasemissionen um 40 % und entsprechend der Zielformulierung der Industriestaaten bis 2050 um mindestens 80 % – jeweils gegenüber 1990 – reduziert werden. Dies bedeutet folgenden Entwicklungspfad bei der Minderung der Treibhausgasemission bis 2050: minus 55 % bis 2030, minus 70 % bis 2040, minus 80 % bis 95 % bis 2050.“ [Bundesregierung 2010]*

Die Zielformulierung spannt damit für das Jahr 2050 eine Bandbreite auf, die sich auf unterschiedliche Arten interpretieren lässt. Eine konservative Auslegung der oberen Grenze wäre die Interpretation als Maximum der Emissionsreduktion, welche nicht überschritten werden soll. Diese Interpretation erscheint jedoch wenig plausibel, da eine unbeabsichtigte deutliche Übererfüllung vor dem Hintergrund der hohen Ambitionen des Ziels kaum zu erwarten ist. Die andere Interpretation ist diejenige, nach der **bisher bewusst noch offen ist, ob eine Dekarbonisierung**

---

<sup>1</sup> Viele bisherige Veröffentlichungen beziehen sich dahingehend explizit oder implizit auf das Kyoto-Protokoll, welches LULUCF und internationalen Verkehr nicht abdeckt.

um 80 % oder 95 % angestrebt wird. Die beiden möglichen Endpunkte sind in Abbildung 1 dargestellt.

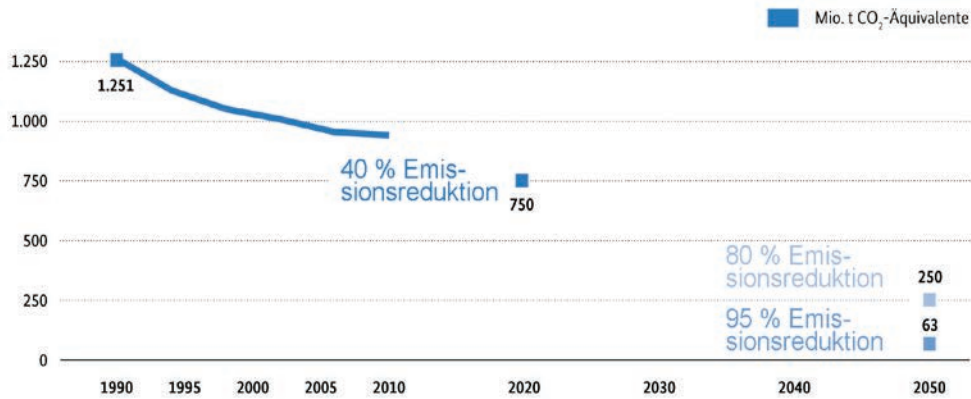


Abbildung 1: Entwicklungspfad der Treibhausgase und mögliche Endpunkte in 2050. Eigene Darstellung nach [BMU 2014]

Die Energiewende und die Treibhausgasreduktion Deutschlands werden in der Öffentlichkeit, der Industrie, der Wissenschaft und der Politik stark diskutiert. Während in der öffentlichen Debatte häufig kurz- und mittelfristige Fragestellungen diskutiert werden, werden im wissenschaftlichen und politischen Kontext auch konkrete Umsetzungsmöglichkeiten der langfristigen Ziele erforscht und diskutiert. Hierbei liegt das Augenmerk bei technisch detaillierten Studien jedoch bisher stärker auf der unteren 80%-Grenze des Korridors. Studien zur (nahezu) vollständigen Dekarbonisierung sind dahingegen meistens technisch abstrakter und beschäftigen sich eher mit grundlegenden Optionen und Konzepten. Bisher existieren im Wesentlichen zwei Studien, die sich mit der Erreichung einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands tiefergehend beschäftigen:

- **Klimaschutzszenario 2050**, 2. Modellierungsrunde [Repenning et al. 2015]
- **Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050** [UBA 2014]

Des Weiteren ist zu bemerken, dass viele technische Detailstudien, z.B. zu bestimmten Treibhausgasminderungsoptionen, nicht konkretisieren, auf welches Emissionsziel sie sich beziehen. Wie die Analysen in diesem Papier zeigen werden, ist dies insofern problematisch, als sich die Rolle einiger Technologien oder die Zweckmäßigkeit bestimmter Maßnahmen in den beiden möglichen Zielfestlegungen häufig deutlich unterscheiden; eine Technologie, die für eine 80%ige Dekarbonisierung zweckmäßig ist, kann sich als hinderlich erweisen, wenn ein ambitionierteres Ziel verfolgt wird.

Das vorliegende Papier versucht, eine Forschungslücke zu schließen, indem es **den möglichen Lösungsraum für eine 95%ige Dekarbonisierung Deutschlands systematisiert**. Ohne bereits Empfehlungen für einen konkreten Umsetzungspfad zu treffen, soll zunächst analysiert werden, welche Randbedingungen für ein derart ambitioniertes Unterfangen existieren. Dabei soll herausgearbeitet werden, welche dieser Randbedingungen aufgrund physikalischer und technischer Zusammenhänge recht genau bestimmt werden können. Es soll aber auch klar dargestellt werden, in welchen Bereichen durch die Unsicherheiten, die bei Analysen über solch lange Zeiträume immer zu berücksichtigen sind, derzeit noch keine klaren Bewertungen getroffen werden können. Darüber hinaus soll gezeigt werden, dass bestimmte Minderungsoptionen mit hohen ökonomischen Kosten verbunden sind oder in der Realität vermutlich mit starken Akzeptanzproblemen verbunden sein werden.

In einigen Punkten zeigt sich, dass **für eine 95%ige Reduktion tendenziell stärker diskrete Entscheidungen** getroffen werden müssen als für eine 80%ige Reduktion. In einigen Bereichen muss entweder Pfad A oder Pfad B eingeschlagen werden, während ein Mittelweg aus beiden oftmals technologisch nicht machbar oder ökonomisch nicht sinnvoll ist. Aus dem heutigen Erkenntnisstand zeichnet sich nicht immer ab, welche Option systemisch am vorteilhaftesten ist. Dies liegt unter anderem daran, dass eine solche Bewertung unter multikriteriellen Gesichtspunkten erfolgen muss. Unterschiedliche Lösungen für die gleiche Problemstellung sind meist mit unterschiedlichen Kosten und Akzeptanzfragen verbunden. So können z.B. in manchen Fällen Akzeptanzfragen durch eine teurere Option umgangen werden, die Mehrkosten wiederum müssen dann jedoch verteilt werden und führen zu anderen Akzeptanzfragen. Die Suche nach einer diesbezüglich ausgewogenen Lösung kann daher nur **das Ergebnis einer gesellschaftlichen Konsensfindung** sein.

In vielen Fällen ist es aber möglich, die dafür relevanten Fragen herauszuarbeiten. Diese sind im Text als „**Kernfragen**“ dargelegt. Sie sollen **aufzeigen, in welchen Bereichen entweder weiterer Erkenntnisgewinn notwendig ist oder politische Weichen gestellt werden müssen, um eine 95%ige Treibhausgasreduktion zu definieren**. Dabei geht es darum, aufzuzeigen, dass in einigen Bereichen Entscheidungen getroffen werden müssen, die auch über den jeweiligen Bereich hinaus starke Auswirkungen auf die Ausgestaltung der Dekarbonisationsstrategie haben.

Parallel dazu werden in diesem Papier einige „**Arbeitshypothesen**“ aufgestellt. Diese werden aus den derzeit vorliegenden Daten und Fakten abgeleitet und dienen dazu, den häufig sehr großen **Möglichkeitsraum zu vereinfachen**. So wird

beispielweise vereinfachend davon ausgegangen, dass es in 2050 zu keinem energetischen Einsatz fossiler Brennstoffe mehr kommen darf, wenn eine 95%ige Reduktion gelingen soll. Es lässt sich zwar zeigen, dass durch geeignete Kompensationsmaßnahmen im nichtenergetischen Bereich auch energetische Emissionen in entsprechendem Umfang zulässig sind; diese Sonderfälle haben aber nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Gesamtbild. Die getroffenen Arbeitshypothesen sind deutlich als solche markiert, ihr Zweck und die Grenzen ihres Geltungsbereichs werden jeweils kurz diskutiert. Zunächst soll jedoch der Begriff „Vollständige Dekarbonisierung“ erläutert sowie die zeitliche Komponente des Transformationsprozesses diskutiert werden.

## **1.2 Was bedeutet „Vollständige Dekarbonisierung“?**

Zunächst einmal muss betont werden, dass eine Anwendung der oberen Grenze des Emissionsreduktionsziels des Treibhausgasminderungsziels von 95% gegenüber der unteren Grenze von 80% ambitionierter ist, als es die notwendige Viertelung der zulässigen Restemissionen in 2050 vermuten lässt. Grund dafür ist ein Sockel an Treibhausgas (THG)-Emissionen, die nur rein theoretisch vermeidbar sind. Einen Großteil dieser Emissionen entsteht dabei in der Landwirtschaft. In dieser stehen zwar, wie in Abschnitt 8.1 erläutert wird, noch viele Reduktionsmaßnahmen zu Verfügung. Das Vermeidungspotential der eher technischen Reduktionsmaßnahmen (wie z.B. Änderungen im Düngemiteleinsatz o.ä.) ist jedoch begrenzt, so dass ab einem bestimmten Punkt weitere Reduktionen nur noch durch Veränderungen der Ernährungsgewohnheiten möglich sind. Politikinstrumente, welche dies anstreben, fallen in den Bereich der sog. Suffizienzmaßnahmen (siehe Abschnitt 2.2). Suffizienzstrategien adressieren die absolute Senkung des Aufwandes, in diesem Fall z.B. der Emissionen, durch Veränderung des Nutzens.

Diese Veränderungen sind zwar durchaus möglich und müssen aufgrund ihres hohen Reduktionspotentials mit bedacht werden, bei der Analyse des Lösungsraums sind sie jedoch schwierig zu bewerten. Durch sie entstehen zwar häufig nur geringe ökonomische Kosten, oftmals sogar Einsparungen, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit ihrer Umsetzung kaum abzuschätzen. So ist beispielweise eine Vorhersage der Wirksamkeit von (politisch angereizten) Veränderungen der Ernährungsgewohnheiten über die nächsten 35 Jahre mit größeren Unsicherheiten versehen als die Analyse bestimmter Effizienzoptionen in der Industrie. Bei der Annahme eines starken Erfolgs von Suffizienzmaßnahmen besteht zudem die Gefahr, dass die notwendigen Schritte in anderen Bereichen unterschätzt werden. Darüber hinaus bedarf die Bewertung der mit der Umsetzung solcher Maßnahmen

verbundenen (staatlichen) Eingriffstiefe in die individuelle Lebensgestaltung auch einer Diskussion vor dem Hintergrund gesellschafts- und ordnungspolitischer Präferenzen, die in diesem Papier nicht geführt wird und sich einer objektiven Analyse entzieht.

Wie sich im Lauf der Analysen in diesem Papier zeigt, aber auch in [Repenning et al. 2015] und [UBA 2014] gefolgert wurde, **kann ein gewisser Teil der nichtenergetischen Emissionen de facto nicht vermieden werden**. Diese werden im Folgenden als „quasi-unvermeidbare“ Emissionen bezeichnet. Den größten Anteil an diesen haben bestimmte Emissionen aus der Landwirtschaft. Quasi-unvermeidbar heißt dabei nicht, dass zukünftig keine Untersuchungen dazu angestellt werden sollten, wie diese Emissionen so weit wie möglich reduziert werden können, denn diese Untersuchungen können nicht zuletzt auch eine Grundlage für gesellschaftspolitische Diskussion sein. Der Ausdruck quasi-unvermeidbar bezieht sich darauf, dass nach heutigem Erkenntnistand nicht davon ausgegangen werden sollte, dass ein großer Teil dieser Emissionen vermieden werden kann und dass dies in den Emissionszielen der anderen Bereiche berücksichtigt werden muss. Dennoch muss betont werden, dass eine rein technische Lösung für eine vollständige Dekarbonisierung ohne Änderung der Lebensgewohnheiten und ohne gesellschaftlichen Einsatz kaum möglich ist, da sie andernfalls mit extrem hohen Kosten verbunden ist.

In der Summe erreichen die quasi-unvermeidbaren Emissionen 2050 einen Wert, der sehr nahe an den maximal zulässigen Emissionen von 63 Mt Kohlenstoffdioxid-Äquivalente (CO<sub>2</sub>-eq) bei einer 95%igen Treibhausgasreduktion liegt (siehe dazu Kapitel 8). Die Obergrenze des Klimaschutzziels, die eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % anstrebt, kann also annähernd als „vollständige Dekarbonisierung“ [UBA 2014] bzw. als Emissionsneutralität bezeichnet werden. Den Begriff „Vollständige Dekarbonisierung“ für eine 95%ige Reduktion zu verwenden ist zunächst verwirrend, da 5 % Emissionen verbleiben. Durch den Sockel der quasi-unvermeidbaren Emissionen, ist der Begriff jedoch zutreffend. Da die quasi-unvermeidbaren Emissionen in 2050 aller Voraussicht nach bereits nahezu das gesamte Emissionsbudget in Anspruch nehmen, wird für die Betrachtungen in diesem Papier die folgende Vereinfachung getroffen.

**Arbeitshypothese 1:** Alle technisch vermeidbaren energiebedingten Emissionen müssen vermieden werden.

Diese Annahme bildet in gewisser Weise die Grundprämisse für die folgenden Abschnitte zur Ausgestaltung des Energiesystems im Falle einer 95%igen Emissionsreduktion. Sie betrifft dabei alle energiebedingten Emissionen sowie einen Großteil der Prozessemissionen. Dabei soll betont werden, dass durch Maßnahmen, welche die quasi-unvermeidbaren Emissionen reduzieren, sowie durch Emissionssenkungen in anderen Bereichen diese Prämisse etwas aufgeweicht werden kann. Sollten die Emissionen außerhalb der Bereiche Energie und Prozesse also unter das mit dem 95%-Ziel konforme Emissionsbudget von 63 Mt CO<sub>2</sub>-eq. fallen, entstünde die Möglichkeit, in begrenztem Umfang auch energetische Emissionen zuzulassen. Diese könnten dann auf Bereiche entfallen, in denen eine vollständige Dekarbonisierung technisch schwierig, sehr teuer oder mit großen Akzeptanzproblemen verbunden ist.

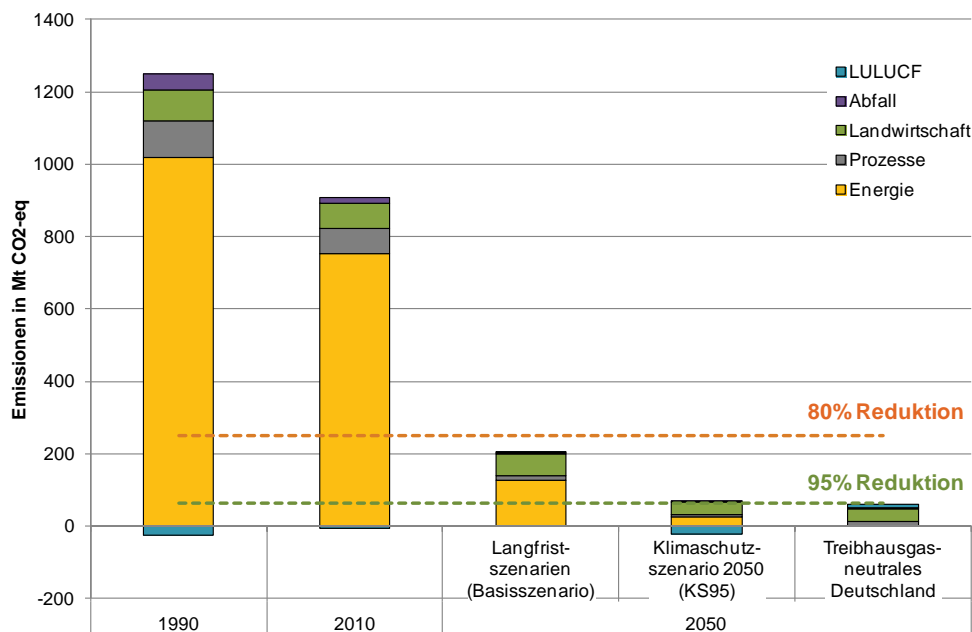


Abbildung 2: Vergleich historischer Emissionen und möglicher Verteilungen in 2050 nach Quellen

Der auch im Zuge des Klimaabkommens in Paris häufig verwendete Begriff der „Emissionsneutralität“ hingegen bedeutet nicht zwangsweise eine vollständige Dekarbonisierung. Für die Emissionsneutralität können frei werdende Emissionen durch „negative Emissionen“ in Treibhausgasen kompensiert werden (siehe



Abschnitt 2.4). In diesem Papier wird im Wesentlichen der Begriff der (vollständigen) Dekarbonisierung verwendet, da unklar ist, welche Rolle künstliche negative Emissionen bis 2050 spielen können; wie sich zeigen wird, können CO<sub>2</sub>-Senken zur Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland vermutlich nur eine unterstützende Funktion haben. **Daher muss aus heutiger Sicht das Hauptaugenmerk der Anstrengungen im Bereich der Emissionsreduktion liegen.**

### **1.3 Bis wann soll die vollständige Dekarbonisierung gelingen?**

Eine weitere wichtige Frage zur vollständigen Dekarbonisierung ist der Zeitpunkt ihrer Erreichung. Eine mögliche Lesart von Szenarien zur vollständigen Dekarbonisierung ist die Interpretation als „Fahrplan“, in dem die nötigen Schritte auf der Zeitachse dargestellt sind. Wenn diese Maßnahmen umgesetzt werden, kann eine vollständige Dekarbonisierung in dem angestrebten Zeitfenster von 35 Jahren gelingen. Eine alternative Interpretation ist die der „Landkarte“. Hierbei stehen die geltenden Rahmenbedingungen und die Frage der langfristigen Vision im Vordergrund. Diese Unterscheidung ist insbesondere vor dem Hintergrund des enormen Ambitionsniveaus und der Pfadabhängigkeiten einer vollständigen Dekarbonisierung wichtig.

Das Grundproblem soll in Abbildung 3 illustriert werden: Es existieren Reduktionspfade, die zwar eine 80%ige Dekarbonisierung in 2050 erreichen, dabei allerdings auf Technologien setzen, die eine weitere Dekarbonisierung schwierig machen. Dies ist z.B. der Fall, wenn emissionsarme, aber nicht emissionsfreie Technologien mit langen Lebensdauern eingesetzt werden, die erst sukzessive in den folgenden Jahrzehnten ausgetauscht werden. Das Erreichen einer 80%igen Reduktion in 2050 beinhaltet nicht automatisch die Möglichkeit, die Emissionen in den darauffolgenden Jahren schnell weiter zu reduzieren. Es existieren aber Pfade, die zwar keine 95%ige Reduktion in 2050 erreichen, es aber ermöglichen, dieses Ziel in den darauffolgenden Jahren zu erreichen. Die eingesetzten Technologien ähneln in diesem Fall vermutlich denen eines Szenarios, in dem für das Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 95 % angestrebt wird. Die Transformationsgeschwindigkeit ist jedoch moderater.

Die im Folgenden vorgestellten Analysen können und sollen nicht verbergen, dass eine 95%ige Dekarbonisierung insbesondere bis zum Jahr 2050 eine immense wirtschaftliche und gesellschaftliche Herausforderung darstellt. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass die Transformation nicht in allen Bereichen schnell genug

vollzogen werden kann. Unabhängig davon erscheint es aber sinnvoll, den langfristigen Transformationspfad mit dem Ziel einer vollständigen Dekarbonisierung stärker in die politischen und wissenschaftlichen Überlegungen mit einzubeziehen. Eine Transformation, bei der in 2050 85 % der Emissionen reduziert sind, die aber über einen klar definierten Pfad verfügt, wie die verbleibenden Emissionen zu reduzieren sind, ist eventuell klimapolitisch sinnvoller als ein Pfad, der zwar 90 % Emissionsreduktion erreicht, aber seine Potentiale mittelfristig bereits voll ausgeschöpft hat.

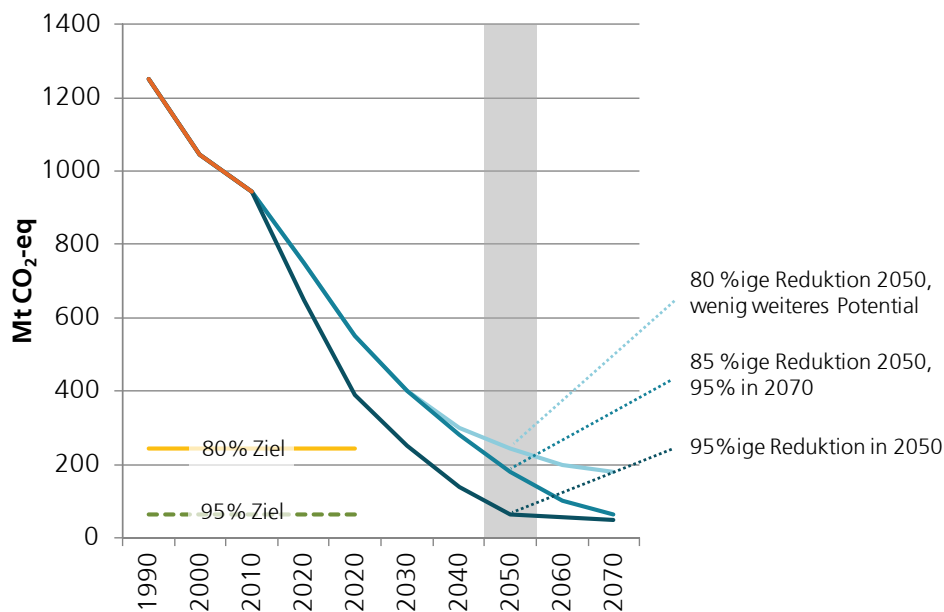


Abbildung 3: Schematische Darstellung verschiedener hypothetischer Emissionsreduktionspfad

In einigen Bereichen existieren „low hanging fruits“, die schnell eine deutliche Reduktion der Emissionen bewirken, langfristig aber nicht zielführend sind. Beispielsweise vermeidet eine moderate energetische Sanierung eines Gebäudes mit dem Tausch der bestehenden Ölheizung gegen eine Gastherme zunächst fossilen Energieverbrauch und Emissionen; für das langfristige Ziel können jedoch eine sehr ambitionierte Sanierung sowie der Anschluss an ein Nah- oder Fernwärmenetz erforderlich sein. In vielen Fällen dürfte eine einmal durchgeführte Sanierung dazu führen, dass eine erneute, bessere Sanierung erst Jahrzehnte später erfolgt. Auch in den anderen Sektoren existieren ähnliche Abhängigkeiten. So ist z.B. klar, dass der Betrieb von Kohlekraftwerken ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung mit einer vollständigen Dekarbonisierung nicht vereinbar ist. Entscheidender als die Frage, ob ein Kohlekraftwerk 2020 oder 2030 stillgelegt wird, ist aber die Frage, durch welche

Technologie es ersetzt wird. Ein erdgasgefeuertes Kraft-Wärme-Kopplungs-(KWK)-Kraftwerk stößt zwar deutlich weniger Emissionen aus, kann für eine vollständige Dekarbonisierung aber allenfalls eine Brückentechnologie sein und muss spätestens bis zum Ende der Transformation stillgelegt werden. Zur Festlegung einer Dekarbonisierungsstrategie ist es unerlässlich, die Transformation vom Ende her zu denken.

Die Analysen in diesem Papier legen den Schluss nahe, dass unser Wissen um die Landkarte der Dekarbonisierung zurzeit vermutlich noch nicht ausreicht, um einen Fahrplan über den gesamten Zeithorizont zu erarbeiten. Daher sollte sich der Diskurs im Hinblick auf den langfristigen Zeithorizont darauf konzentrieren, mögliche Ziele zu diskutieren und deren Erreichung offen zu halten.

## 2 Rahmenbedingungen der Dekarbonisierung

In diesem Kapitel sollen zunächst verschiedene übergeordnete Fragestellungen skizziert werden. Diese haben starken Einfluss auf die Möglichkeiten zur Erreichung einer 95%igen Reduktion der Treibhausgase und werden daher vor den konkreten Bedingungen und Möglichkeiten in den einzelnen Sektoren in den danach folgenden Kapiteln diskutiert.

### 2.1 Welche klimapolitischen Ziele verfolgen Europa und der Rest der Welt?

Die Frage, in welchem Umfeld sich die deutsche Dekarbonisierung abspielt, war in den bisherigen Studien nicht oder nur am Rande Teil der Betrachtungen. Dies ist insofern problematisch, als dass die **internationalen Entwicklungen immensen Einfluss** auf die erforderlichen Anstrengungen für die Erreichung der deutschen Emissionsminderungsziele oder zumindest deren tatsächliche Klimawirkung haben dürften. Die zentrale Kernfrage zur Ausgestaltung der Dekarbonisierung lautet daher:

**Kernfrage 1:** Besteht eine deutliche Diskrepanz zwischen dem Ambitionsniveau des internationalen Klimaschutzes und Deutschlands?

Das **Ambitionsniveau** soll im Folgenden zur Vereinfachung der Diskussion am CO<sub>2</sub>-Preis gemessen werden. Dieser ist nicht zwangsweise identisch mit dem Preis für CO<sub>2</sub>-Zertifikate, z.B. dem Preis für Emissionszertifikate des European Union Emission Trading Scheme (EU ETS). So kann z.B. auch für bestimmte Bereiche außerhalb des ETS eine CO<sub>2</sub>-Steuer gelten oder die Transformation durch ordnungsrechtliche Vorschriften forciert werden. Maßnahmen, die nicht allein durch den CO<sub>2</sub>-Preis getrieben sind, lassen sich aber zumindest näherungsweise in einen CO<sub>2</sub>-Vermeidungspreis „übersetzen“. **Am Ende steht dahinter die Frage, inwieweit Gesellschaften oder Länder bereit sind, CO<sub>2</sub> zu vermeiden.** Sollte der Rest der Welt eine 80%ige Emissionsreduktion anstreben, Deutschland aber eine vollständige Dekarbonisierung, entstünde eine Ambitionsdiskrepanz, ausgedrückt in einem höheren CO<sub>2</sub>-Preis in Deutschland als im Rest der Welt.

**Deutliche Differenzen im CO<sub>2</sub>-Preis führen potentiell zu Spannungen und Verwerfungen im System.** Wie sich diese auswirken, ist von vielen Faktoren abhängig. So kann z.B. das Fördern oder ordnungsrechtliche Durchsetzen von höheren Wohnungsdämmstandards in Deutschland als im Rest der Welt von der monetären Belastung abgesehen zu relativ geringen Folgeeffekten führen. Es ist z.B.

nicht davon auszugehen, dass dies zu Abwanderung in großem Maßstab führt, wenngleich die Effekte auf die Wohlfahrt auch in diesem Fall substantiell sein können. Im Industriesektor hingegen müssen die Entwicklungen im Rest der Welt differenziert betrachtet werden. Nehmen wir beispielsweise an, dass in Deutschland durch einen höheren CO<sub>2</sub>-Preis der Einsatz von fossilen Brennstoffen in Hochöfen zur Stahlproduktion nicht mehr ökonomisch ist und stattdessen aus Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) erzeugtes Methan eingesetzt wird. Die dadurch höheren Produktionskosten können zu einem signifikanten Abwandern der Stahlproduktion in Länder führen, in denen Emissionen weniger stark penalisiert sind. In diesem Fall fände in Deutschland zwar eine Emissionsreduktion statt, die globalen Emissionen würden jedoch real nicht vermindert, es kommt zum sog. *Carbon leakage*.

Auch im Stromsektor besteht durch die stetig zunehmende Vernetzung im Rahmen des Elektrizitätsbinnenmarkts die Gefahr von Verzerrungen. Ob und mit welchen Maßnahmen beispielweise verhindert werden kann, dass zukünftig fossile Stromerzeugung aus dem Ausland in ein dekarbonisiertes Stromsystem in Deutschland importiert wird, hängt von den zukünftigen Rahmenbedingungen am europäischen Strommarkt ab.

Verschiedene Maßnahmen zur Vermeidung von Carbon leakage wurden und werden im Rahmen des ETS und der internationalen Klimaschutzdebatte diskutiert und sollen aufgrund ihres Umfangs hier nicht dargelegt werden.

Über all dem steht auch die Frage, welches Ziel eine vollständige Dekarbonisierung Deutschlands verfolgt, wenn der Rest der Welt ein niedrigeres Ambitionsniveau verfolgt. Im globalen Kontext machen die deutschen Emissionen weniger als 2,5 % aus. In Deutschland die Emissionen deutlich stärker zu senken als im Rest der Welt hat, ohne dass sich weitere Folgewirkungen einstellen, auf die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre nur geringen Einfluss. Ein Übertreffen des internationalen Ambitionsniveaus könnte also eher unter den Gesichtspunkten einer Vorreiterrolle gesehen werden. Das ist sicherlich in gewissem Umfang, z.B. in bestimmten Sektoren oder Branchen denkbar, hat aber auch Auswirkungen bei der Technologiewahl, da dann die gewählten Lösungsansätze skalierbar und übertragbar sein sollten.

**Zusammenfassend soll betont werden, dass Deutschland stärker im internationalen Kontext betrachtet werden muss**, sollten klimapolitische Ziele geplant werden, die ambitionierter sind als die der europäischen Nachbarn oder im Rest der Welt. Im Folgenden wird im Wesentlichen davon ausgegangen, dass keine

deutliche Diskrepanz zwischen dem Ambitionsniveau Deutschlands und dem Rest der Welt besteht bzw. dass an den Stellen, an denen eine Diskrepanz starke Auswirkungen hat, entsprechende Maßnahmen zur Kompensation eingesetzt werden.

**Arbeitshypothese 2:** Im Rahmen der Analyse dieses Papiers wird davon ausgegangen, dass keine deutliche Diskrepanz zwischen dem Ambitionsniveau Deutschlands und dem Rest der Welt besteht.<sup>2</sup>

## 2.2 Welche Rolle können Suffizienzmaßnahmen spielen?

Nachhaltigkeitsstrategien im Energiebereich werden häufig in die drei Säulen **Konsistenz**, **Effizienz** und **Suffizienz** klassifiziert. Konsistenz bezieht sich dabei auf den Einsatz umweltfreundlicher Technologien, wie z.B. Erneuerbarer Energien, während Effizienz darauf abzielt, den gleichen technischen Nutzen mit einem geringeren Einsatz an Energie zu erzielen. Der energetische Wirkungsgrad sei wie folgt definiert:

$$\text{Energetischer Wirkungsgrad} = \frac{\text{Technischer Nutzen}}{\text{Energetischer Aufwand}}$$

**Konsistenz und Effizienz** zielen also darauf ab, den **energetischen Aufwand zu verändern oder zu reduzieren**, während der technischen Nutzen dabei qualitativ und quantitativ mindestens konstant gehalten werden soll. „Mindestens“ darum, weil mit beiden Ansätzen häufig auch eine Steigerung des Nutzens einhergeht. Ein einfaches Beispiel hierfür ist, dass nach einer energetischen Sanierung die Bewohner häufig eine höhere Raumtemperatur wählen, da diese nun ökonomisch günstiger ist.

**Suffizienz** adressiert im Gegensatz zu Effizienz- und Konsistenzstrategien explizit die **absolute Senkung des Aufwandes** durch **Veränderung des Nutzens**. Suffizienzmaßnahmen bezeichnen somit Strategien, die die Nachfrage nach technischem Nutzen, Gütern und Dienstleistungen so verändern, dass eine absolute Reduktion des Energie- und/ oder des Ressourcenverbrauchs resultiert. **Das Ziel von Suffizienzstrategien ist es, persönliche Bedürfnisse, Bedarfe und Wünsche mit persönlichen, gesellschaftlichen und ökologischen Grenzen in Einklang zu bringen.** Suffizienz basiert damit auf individuellen Entscheidungen, die einen entsprechenden gesellschaftlichen Rahmen brauchen, d.h. eine Suffizienzpolitik,

---

<sup>2</sup> Die Bereiche, bei denen eine Diskrepanz besonders schwerwiegende Auswirkungen hat, werden aber benannt und soweit möglich kurz diskutiert.

die individuelle Entscheidungen zu suffizienten Praktiken und Lebensstilen ermöglicht, erleichtert und bestärkt [Linz und Scherhorn 2011].

In [Brischke et al. 2015] wurden drei prinzipielle Ansätze für Energiesuffizienz beschrieben:

- **Zeitliche und räumliche Anpassung** der bereitgestellten Güter und Dienstleistungen an die tatsächlich konsumierten (Abbau von Fehl- und Überdimensionierung), z.B. Reduktion von Nahrungsmittelabfällen, Anpassung von Wohnungsgrößen an Bedarfe der demografischen Entwicklung, Abschaltung nicht benötigter Geräte, Reduktion von Raumtemperaturen bei Abwesenheit.
- Randbedingung einer Anpassung ist, dass der tatsächlich benötigte bzw. gewünschte Nutzen qualitativ und quantitativ konstant bleibt, aber der angeforderte bzw. der gelieferte Techniknutzen passgenau auf die Nutzerbedürfnisse durch die Technik bereitgestellt wird. Anpassung zielt damit auf den Abbau oder die Vermeidung überdimensionierter, nicht angeforderter oder nicht in Anspruch genommener Lieferungen von Techniknutzen ab.
- Die **Substitution** der Nachfrage nach energie- und ressourcenintensiven Gütern und Dienstleistungen durch weniger energie- und ressourcenintensive ist eine Suffizienzstrategie zu einer qualitativen Veränderung der Nachfrage. Beispiele hierfür sind der Ersatz von tierischen Nahrungsmitteln durch pflanzliche, der Konsum saisonaler Produkte, energie- und ressourcenschonende Verkehrsmittelwahl, andere Freizeitgestaltung. Ein Spezialfall der Substitution ist die Nulloption, d.h. der vollständige Verzicht auf einen Nutzen, ein Konsumgut oder eine Dienstleistung. Die durch die Nulloption gewonnene Zeit bzw. das eingesparte Geld werden anderweitig eingesetzt. Dies entspricht einer qualitativen Substitution von Nutzen und Nutzenaspekten. Am Beispiel der Nulloption wird besonders deutlich, dass eine weitere zentrale Aufgabe für die Ausgestaltung von Suffizienzstrategien darin besteht, Lösungsansätze für den Umgang mit frei gewordenen Ressourcen, insbesondere Zeit und Geld, zu entwickeln, ohne dass sich daraus neue energie- und ressourcenintensive Praktiken und Lebensweisen entwickeln.
- **Reduktion** der Nachfrage nach energierelevanten Gütern und Dienstleistungen ist eine Suffizienzstrategie, die zu einer **quantitativen Verringerung der Nachfrage** führt. Die nachgefragten Güter und Dienstleistungen stehen weiterhin zur Verfügung, werden jedoch in geringerem Umfang konsumiert oder in Anspruch genommen. Beispiele hierfür sind die Reduktion der Personenkilometer pro Jahr, der Wohnfläche pro Kopf, der Haushaltsstromverbrauch pro Kopf oder die Reduktion des Mobilitätsbedarfs durch Städte der kurzen Wege.

Das Potenzial eines Beitrags von Suffizienzstrategien zum Erreichen eines ambitionierten Emissionsminderungsziels kann grundsätzlich erheblich sein. In vielen Fällen stellen Suffizienzstrategien im Vergleich mit Effizienz- und Konsistenzstrategien die kostengünstigste Option zur Erreichung eines Energieverbrauchs-Reduktionszieles dar. Die Tatsache, dass sie in modellbasierten Zukunftsszenarien häufig nicht oder nur am Rande berücksichtigt werden, liegt auch an der Schwierigkeit ihrer objektiven Bewertung: Bei Konsistenz- und Effizienzmaßnahmen sind zumeist die technischen und ökonomischen Faktoren bei der Bewertung die wesentlichen Faktoren.<sup>3</sup> Suffizienzstrategien hingegen gehen mit z.T. erheblichen Veränderungen der bisherigen Konsummuster der Verbraucher einher. Solche Veränderungen verschließen sich einer – wenigstens näherungsweise objektiven – ökonomischen Bewertung.

Nicht erst seit den Diskussionen um den bevormundenden Charakter des „Veggie-Days“<sup>4</sup> gelten bestimmte Suffizienzmaßnahmen als politisch kaum umsetzbar und werden daher nicht offen diskutiert. Dabei ist zu beachten, dass auch bei Effizienz- und Konsistenzstrategien sowie auf der Energieangebotsseite die Akzeptanz eine immer stärkere Rolle spielt. Für eine vollständige Dekarbonisierung werden in allen Sektoren und Bereichen sehr starke Eingriffe notwendig sein. Die dafür notwendigen technischen Maßnahmen und Kostenwirkungen berühren in einem Maße Akzeptanzfragen, in dem ein Abwägen mit Suffizienzmaßnahmen unumgänglich ist. Bei der Gewichtung der Beiträge von Effizienz-, Konsistenz- und Suffizienzstrategien zum Erreichen der klimapolitischen Ziele sind somit die Akzeptanz der Bevölkerung und die gesellschaftspolitischen Präferenzen entscheidende Einflussfaktoren.

### **2.3 Steht CCS als Option zu Verfügung?**

Mit den Einsatzmöglichkeiten, technischen Optionen und Hemmnissen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) beschäftigt sich eine große Anzahl an Studien. CCS zielt darauf ab, CO<sub>2</sub>-Emissionen vor, während oder nach der Verbrennung abzuscheiden und unterirdisch einzulagern. Die Technologie, genau genommen die Technologien, sind zentraler Bestandteil in vielen Szenariostudien zur Reduktion von Treibhausgasen, unter anderem in 101 von

---

<sup>3</sup> Auch bei eher technischen Maßnahmen spielen Akzeptanzgesichtspunkte natürlich eine Rolle, fließen aber eher in Form von Potentialbeschränkungen und dem direkten Vergleich unterschiedlicher Optionen ein.

<sup>4</sup> Der „Veggie-Day“ bezeichnet den Vorschlag, in öffentlichen oder privaten Einrichtungen an einem bestimmten Tag der Woche nur vegetarische Gerichte anzubieten.



116 2°-Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) und den meisten EU-Szenarien mit dem Modell PRIMES der Nationalen Technischen Universität Athen. Des Weiteren sind die Technologien ein **wichtiger Bestandteil der Dekarbonisierungsstrategie vieler Länder**, darunter auch einiger EU-Mitgliedstaaten. Dem gegenüber stehen die Tatsachen, dass die Technologien noch **nicht in großem Maßstab eingesetzt** werden und in vielen Ländern mit **starken Akzeptanzproblemen** zu kämpfen haben, die sich in vielen Fällen in einem vorsichtigen bis restriktiven regulatorischen Rahmen niederschlagen.

Im Hinblick auf eine vollständige Dekarbonisierung ist festzustellen, dass es einen großen Einfluss hat, ob CCS als Option zu Verfügung steht. CCS stellt insbesondere für zwei Bereiche eine Option dar, für die alternative Optionen kaum vorhanden, noch ungenügend erforscht oder kostspielig sind: Zum einen die Versorgung der Nah- und Fernwärmenetze und zum anderen bestimmte industrielle Prozessmissionen. Steht CCS als Option nicht zur Verfügung, muss für diese Bereiche intensiv nach Alternativlösungen gesucht werden. Daher lautet eine weitere Kernfrage:

**Kernfrage 2:** Steht CCS prinzipiell als Reduktionsoption zu Verfügung? Falls ja, in welchen Bereichen (also insbesondere Industrie, Stromerzeugung und netzgebundene Wärme)?

**Zu beachten ist dabei, dass CCS-Einsatz den jeweiligen Prozess nicht zwangsweise vollständig von Emissionen befreit.** Je nach CCS-Technologie ergeben sich Abscheideraten von deutlich unter 100 %. Dies ist insbesondere bei Pre- und Post-Combustion der Fall, in denen die Abscheideraten nach derzeitigen Schätzungen eher bei 90 % liegen und es unwahrscheinlich ist, dass Abscheideraten über 95 % technisch zu vertretbaren Kosten möglich sind. Bei Oxyfuel-CCS können theoretisch 100 % des CO<sub>2</sub> abgeschieden werden.

Unabhängig vom eigentlichen Prozess können aber **Leckagen bei Transport und Speicherung** auftreten. Wenn es gelingt, hierfür Werte von deutlich unter 0,5 % zu erreichen, würden die Leckagen aus Emissionsbilanzsicht kein unüberwindbares Hindernis bzw. keinen Widerspruch zu einer vollständigen Dekarbonisierung darstellen.

## 2.4 Welche CO<sub>2</sub>-Senken können und sollen erschlossen werden?

Zusätzliche bzw. alternative Reduktionsoptionen bestehen im Erschließen von natürlichen oder künstlichen CO<sub>2</sub>-Senken. Darunter fällt eine große Bandbreite an Maßnahmen, der Atmosphäre CO<sub>2</sub> zu entziehen und dann möglichst langfristig zu binden. Natürliche Senken können beispielsweise durch Wiederaufforstung oder Rückvernässung von Mooren erschlossen werden (siehe Abschnitt 8.1).

**Künstliche CO<sub>2</sub>-Senken sind technische Lösungen, um der Atmosphäre CO<sub>2</sub> zu entziehen.** Häufig wird für diese Technologien auch der englische Begriff „Geoengineering“ verwendet. Ihnen ist gemein, dass sie **bisher allenfalls in Pilotprojekten** erforscht werden. Viele der Technologien sind kontrovers und werden häufig als Versuche kritisiert, ein Versagen bei der Reduktion der Treibhausgasemissionen an anderer Stelle zu kompensieren. Vor dem Hintergrund eines 95-%-Ziels sollte jedoch bedacht werden, dass einige dieser Maßnahmen das Potential haben, ökonomisch günstiger oder einfacher umsetzbar zu sein als ihre alternativen Reduktionsoptionen. **Es könnte insbesondere in den späteren Jahren des Transformationsprozesses günstiger sein, CO<sub>2</sub> über Senken zu kompensieren als die letzten CO<sub>2</sub>-Quellen restlos zu eliminieren.**

In den folgenden Abschnitten wird aber hergeleitet, dass das Wissen über die künstlichen Senken derzeit zu begrenzt ist, um sie angemessen als Alternativen bewerten zu können. Des Weiteren sind die **voraussichtlichen Kosten sehr hoch**. Daher sollten sich Aktivitäten in diesem Bereich zunächst weiter auf **Forschung und Entwicklung** konzentrieren. Erst dann sollte eine Bewertung erfolgen, welche Rolle künstliche CO<sub>2</sub>-Senken in der Strategie zur Erfüllung der Klimaschutzziele spielen können. Für das Papier wird daher die folgende Vereinfachung getroffen:

**Arbeitshypothese 3:** Es sollte nicht davon ausgegangen werden, dass künstliche CO<sub>2</sub>-Senken neben dem eventuell zweckmäßigen Einsatz von Biomasse in CCS-KWK-Kraftwerken bis 2050 eine bedeutende Rolle in der CO<sub>2</sub>-Reduktion spielen werden.

Im Folgenden sollen zwei häufig diskutierte künstliche CO<sub>2</sub>-Senken beispielhaft diskutiert werden um das Potential und die Hemmnisse aufzuzeigen.

### 2.4.1 Biomasse-CCS

Wird CO<sub>2</sub> bei fossilen Brennstoffen abgeschieden und eingespeichert, ergibt sich (ohne Berücksichtigung von Rest-CO<sub>2</sub> im Abgas und Leckagen bei Transport und Speicherung) eine neutrale CO<sub>2</sub>-Bilanz. Das vormals in der Erde in fossilen Energieträgern gespeicherte CO<sub>2</sub> wird wieder in diese zurückgeführt, ohne in die Atmosphäre zu gelangen. Wird der gleiche Prozess mit Biomasse als Brennstoff durchgeführt, wird der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzogen und geologisch eingelagert (siehe Abbildung 4). Diese Technik wird häufig unter der englischen Abkürzung BECCS (Bioenergy with CCS) geführt und ist eine Möglichkeit, **bilanziell negative Emissionen** zu erzeugen. Die eingespeicherten CO<sub>2</sub>-Emissionen hängen von den Abscheideraten des CCS-Prozesses, aber auch stark von der eingesetzten Biomasseart ab. Sie liegen in der Größenordnung von 0,2-0,35 Mt negativer CO<sub>2</sub>-Emissionen pro TWh eingesetzter Biomasse.

Die Technologie wird stark diskutiert, u.a. weil **sie in den Szenarien des IPCC eine zentrale Dekarbonisierungstechnologie** darstellt; von 116 hier relevanten Szenarien<sup>5</sup> setzen 101 BECCS ein. In einem Drittel dieser Szenarien deckt BECCS mehr als 20 % des Primärenergiebedarfs. Der Grund dafür ist, dass es für die eingesetzten Modelle immer schwieriger wird, plausible Reduktionspfade bis 2050 zu entwickeln, die mit dem 2°-Ziel kompatibel sind. Die nötige Reduktion bis 2050 stellt einen zu starken Bruch mit den bisherigen Entwicklungen dar. Das Generieren von negativen Emissionen insbesondere nach 2050 ist dann eine Möglichkeit, der Atmosphäre das bis dahin zu stark ausgestoßene CO<sub>2</sub> wieder zu entziehen.

---

<sup>5</sup> „430-480 ppm Szenarien“ (also Szenarien, die wahrscheinlich die Klimaerwärmung bis 2100 auf unter 2° C begrenzen)

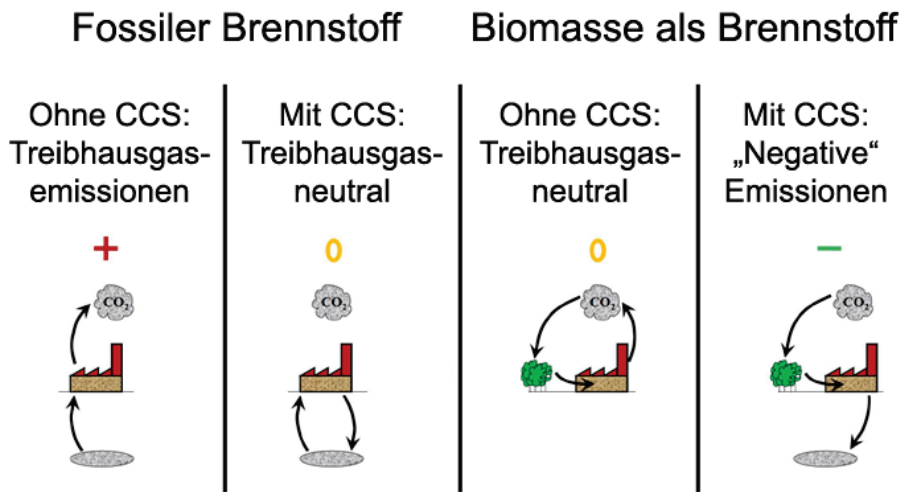


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Treibhausgaswirkung unterschiedlicher Brennstoffe. Eigene Darstellung nach: [www.biorecro.se](http://www.biorecro.se)

Als problematisch ist dabei einzuschätzen, dass die Technologie in mehreren Punkten Akzeptanzfragen berührt: Zum einen sind CCS-Technologien in Deutschland und vielen anderen Ländern stark umstritten. Zum anderen birgt eine deutliche Steigerung des Biomasseeinsatzes die Gefahr, die Diskussion um die Flächenkonkurrenz<sup>6</sup> zu verschärfen. Des Weiteren muss beachtet werden, dass BECCS, wie alle CCS-Technologien, nur in stationären Anwendungen ab einer gewissen Größe technisch möglich ist. Die dort eingesetzte Biomasse steht dann nicht mehr in den nicht-stationären oder kleinen Anwendungen zur Verfügung. Gerade diese Bereiche stellen aber, wie die weiteren Ausführungen zeigen werden, bei ambitionierten Zielen die größten Herausforderungen dar. In einem extremen Fall könnte BECCS dann den Einsatz von Biomasse beispielweise im anders schwer zu dekarbonisierenden Flugverkehr begrenzen und somit dort zu Emissionen führen. BECCS konkurriert daher mit anderen Dekarbonisierungsoptionen um den effizientesten und effektivsten Einsatz der Biomasse.

Insofern kann BECCS nicht als „Allheilmittel“ gesehen werden, sondern sollte als **Option für einzelne kritische Bereiche** betrachtet werden. Ein mögliches Einsatzgebiet in diesem Zusammenhang könnte die **Bereitstellung von Fernwärme**

<sup>6</sup> Dieser gelegentlich auch als „Tank oder Teller“-Debatte bezeichnete Diskurs dreht sich um die Frage, inwieweit eine Nutzung begrenzter Landflächen zum Anbau von Energiepflanzen ethisch vertretbar ist. Durch die Flächenkonkurrenz besteht die Gefahr, dass bei Ausweitung des Energiepflanzenanbaus die Preise für Lebensmittel steigen.

sein. Hier stoßen die alternativen EE-Optionen (im Kontext einer vollständigen Dekarbonisierung also vorwiegend Solarthermie und Power-to-heat) ab gewissen Anteilen an technische bzw. technoökonomische Grenzen; bei Solarthermie erzeugt die schlechte Übereinstimmung von Heizbedarf und Sonneneinstrahlung ab bestimmten Anteilen einen großen Bedarf an saisonalen Speichern. Bei Power-to-heat stellen mit steigenden Anteilen Systemflexibilität und EE-Potentiale zunehmend Hemmnisse dar. Ob BECCS zur Deckung der verbleibenden Nachfrage eine Rolle spielen kann, hängt dann auch stark von der Flexibilität der BECCS-Heiz- bzw. Heizkraftwerke ab. Derzeit ist noch nicht klar, inwieweit diese technisch zu einer stark nicht-kontinuierlichen Fahrweise in der Lage sind.

Erfolgt für das bei der Biomasseverbrennung abgeschiedene und eingespeicherte CO<sub>2</sub> im ETS eine Gutschrift, wird BECCS unter der Annahme moderater Biomassepreise bei ähnlich hohen CO<sub>2</sub>-Preisen ökonomisch attraktiv wie CCS-Einsatz bei konventionellen Brennstoffen. **Soweit die sonstigen Rahmenbedingungen es zulassen, kann BECCS also bereits bei CO<sub>2</sub>-Preisen von unter 100 EUR/t attraktiv werden** und ist somit eine Option, die für eine vollständige Dekarbonisierung durchaus ökonomisch attraktiv ist. Wichtig ist dabei, neben der Akzeptanz von CCS im Allgemeinen, vor allem die Frage, wie viel Biomasse Deutschland zu Verfügung steht (siehe Abschnitt 2.5.1).

## 2.4.2 CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft

Unter dem Begriff „CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft“ sind unterschiedliche chemische Verfahren subsumiert, die unter Energiezufuhr CO<sub>2</sub> aus der Luft abscheiden und in Feststoffen oder Flüssigkeiten binden. Das CO<sub>2</sub> wird dabei durch unterschiedliche Stoffe gebunden, beispielsweise Natriumhydroxid oder Amine, die auch bei der nachgelagerten Abscheidung in CCS-Kraftwerken (Post-combustion CCS) zum Einsatz kommen sollen. Einige der Konzepte werden auch als „künstliche Bäume“ bezeichnet, da sie - wie Pflanzen - CO<sub>2</sub> aus der Luft chemisch binden. Die CO<sub>2</sub>-Aufnahmefähigkeit der künstlichen Bäume übertrifft die natürliche um mehrere Größenordnungen.

Zu den zentralen technischen Problemen, mit denen alle diesbezüglichen Konzepte zu kämpfen haben, zählt die im Vergleich zu Kraftwerksabgasströmen ca. 300 Mal niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft. Während in Kraftwerken große Mengen CO<sub>2</sub> lokal konzentriert anfallen, müssen bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft große Luftströme zugeführt werden. Ein weiteres Problem stellt die Reinigung der Anlagen bzw. des Sorptionsmittels von dem gebundenen CO<sub>2</sub> dar.

Die Technologien sind kostspielig, da neben den eigentlichen Kosten für die Infrastruktur der Abscheidung noch die Energiekosten anfallen. Aufgrund der bisher sehr begrenzten Erfahrung mit der Technologie sind konkrete Kostenschätzungen schwierig. Schätzungen zum Energieeinsatz liegen in der Größenordnung von 2,29 MWh/t (Sternier 2009), was bei Strombezugskosten von 7 €/kWh zu Energiekosten von mindestens 160 €/t führt. Vollkostenabschätzungen mit Berücksichtigung der Kosten für die Infrastruktur liegen deutlich darüber. So kommt die American Physical Society auf eine Größenordnung von 600 \$/t [APS 2011], während [House et al. 2011] 1.000 \$/t angibt. **Sollte es nicht gelingen, die Kosten sehr stark zu reduzieren, wird CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft in der Dekarbonisierung bis 2050 nur eine untergeordnete Rolle spielen**, da sie erst bei extrem hohen CO<sub>2</sub>-Preisen zum Einsatz kommt. Sollten die Vermeidungskosten für CO<sub>2</sub> jedoch das Kostenniveau der Luftabscheidung erreichen, würde diese als Back-stop-Technologie fungieren, die alle weiteren Reduktionen über eine Kompensation durch negative Emissionen erreicht.

### 2.4.3 Weitere Ansätze des Geoengineerings

Neben den beiden oben genannten Senkentechnologien existiert eine große Anzahl weiterer Ansätze des Geoengineerings. Neben dem Nutzen natürlicher Senken wie dem Aufforsten von Bäumen zielen viele Ansätze darauf ab, die CO<sub>2</sub>-Aufnahmekapazität der Meere zu steigern. Erforscht wird unter anderem Düngung zur erhöhten Bildung von Algen, die CO<sub>2</sub>-binden, Biomasseeinlagerung im Meer, Kalkeinbringung sowie Veränderungen der Meeresschichtung.

Daneben gibt es Ansätze zum aktiven Strahlungsmanagement, also Ansätzen, die eingehende Solarstrahlung mindern und so den Treibhauseffekt mindern, beispielsweise durch Veränderungen der Wolken oder Erhöhung der Reflektion von bestimmten Teilen der Erdoberfläche. Auch diese Ansätze befinden sich alle in frühen Forschungs- und Entwicklungsstadien.

## 2.5 Wie kann der Mix der Energieträger gestaltet werden?

Aus Arbeitshypothese 1, dass für eine vollständige Dekarbonisierung alle technischen Reduktionsoptionen im energetischen Bereich umgesetzt werden müssen, leitet sich eine weitere Vereinfachung ab:

**Arbeitshypothese 3:** Für eine vollständige Dekarbonisierung muss der energetische Einsatz von fossilen Brennstoffen ohne CCS vollständig vermieden werden.

Diese Arbeitshypothese kann durch Maßnahmen im nichtenergetischen Bereich teilweise aufgeweicht werden. Auch hier gilt aber, dass die Kompensation in anderen Bereichen vermutlich keine Ausmaße annehmen kann, bei denen sich die zentralen Konzepte von denen einer vollständigen Verdrängung des Einsatzes fossiler Ressourcen ohne CCS unterscheiden.

Arbeitshypothese 3 bedeutet, dass die gesamte Energienachfrage gedeckt werden sollte durch:

- Strom aus Erneuerbaren Energien,
- Solar- und Geothermie,<sup>7</sup>
- biogene Brennstoffe (deren Gesamtpotential aber beschränkt ist<sup>8</sup>) oder
- regenerativ erzeugte chemische Energieträger (Wasserstoff, regeneratives Methan, flüssige Kraftstoffe etc.).

Dies verdeutlicht die Bedeutung des Umwandlungs- bzw. Stromsektors. Weiterhin sind andere Umweltprobleme, die bei der Erzeugung von Strom über Erneuerbare Energien entstehen (z.B. Lärm, Schattenwurf, Flächenversiegelung etc.) einzubeziehen und dabei abzuwägen. **Die nicht direkt vor Ort durch biogene Brennstoffe, Solar- und Geothermie gedeckte Nachfrage muss entweder direkt über EE-Strom oder aus EE-Strom gewonnenen Energieträgern gedeckt werden.** Emissionen des Stromsektors können zunächst durch günstige und technisch erprobte Technologien wie Wind- und Solarenergie bis zu einem gewissen Grad relativ einfach und kostengünstig reduziert werden. Kann jedoch gar nicht mehr auf fossile Energieträger zurückgegriffen werden, wird Flexibilität in zunehmendem Maß zu einer Herausforderung.

**Dies führt zu einer weiteren Schlussfolgerung: Energieeffizienz und -suffizienz haben in einer vollständig dekarbonisierten Welt keine direkte Emissionsvermeidungsfunktion mehr.** Sie sollen lediglich die Endenergienachfrage

---

<sup>7</sup> Ggf. kann auch mechanische Energie aus erneuerbaren Quellen unterstützend genutzt werden, z.B. in Zugdrachenantrieben bei Seeschiffen. Der Gesamtbeitrag ist aber stark begrenzt.

<sup>8</sup> Die Beschränkung der Verfügbarkeit könnte durch Algenkraftstoffe, die manchmal auch als 3. Generation der Biokraftstoffe bezeichnet werden, erhöht werden. Durch die derzeit aber sehr hohen Kosten ist eine baldige Diffusion nicht zu erwarten.

auf ein Niveau senken, bei dem die Nachfrage nach klimaneutralen Energieträgern kosteneffizient gedeckt werden kann<sup>9</sup>. Dabei sind die Berücksichtigung von Potentialrestriktionen, Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit zentrale Aspekte. Während Effizienzmaßnahmen heute den Verbrauch von fossilen Energieträgern senken, ist dies in einer dekarbonisierten Welt naturgemäß nicht mehr der Fall. Bei der Überlegung, ob eine bestimmte Effizienzmaßnahme sinnvoll ist, muss daher geprüft werden, ob sie günstiger ist als der Mehraufwand, den die Bereitstellung der eingesparten Energie im Stromsektor erzeugen würde. Auch hier werden Akzeptanzfragen berührt; es muss dann z.B. abgewogen werden, ob weitere Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen und deren Kosten eher akzeptiert werden als weitere EE-Anlagen, der Ausbau von Stromleitungen und die damit verbundenen Kosten.

### 2.5.1 Wie viel Biomasse steht Deutschland zu Verfügung?

Für biogene Brennstoffe muss von einem begrenzten Potential ausgegangen werden. Welche Größe hierfür anzusetzen ist, hängt von diversen Faktoren ab. Zentrale Parameter sind hierbei

- die für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung stehende Fläche,
- der Ertrag dieser Flächen, der insbesondere von Pflanzenart und Düngung abhängt, und
- die Importmengen.

Für die beiden ersten Punkte, die eine Abschätzung der innerdeutschen Produktion erlauben, gibt es eine Vielzahl an Studien, deren Spannweite jedoch überschaubar ist. In den Langfristszenarien wird eine leichte Zunahme der Anbaufläche für Energiepflanzen von derzeit 2,1 Mio. ha auf 2,6 Mio. ha unterstellt. Bei Berücksichtigung der Rest- und Abfallstoffe ergibt sich daraus ein energetisches Gesamtpotential von 306 Terawattstunden (TWh) im Jahr 2050.

**Deutlich strittiger ist hingegen die Frage, wie viel Biomasse Deutschland importieren kann und sollte.** Hier stellt sich zunächst erneut die Frage, in welchem internationalen Kontext die deutsche Dekarbonisierung stattfindet. Nimmt Deutschland eine Vorreiterrolle in einer weniger ambitionierten Welt ein, ist möglicherweise die internationale Nachfrage nach Biomasse verhältnismäßig niedrig

---

<sup>9</sup> Zusätzlich vermeidet Energieeffizienz die negativen Umweltauswirkungen durch EE- und Infrastrukturausbau (Flächenversiegelung, Einfluss auf Fauna etc.) sowie den dafür notwendigen Ressourceneinsatz.



und Biomasse könnte in hohem Maße importiert werden. Dies würde aber der Vorreiterrolle widersprechen, da Deutschland dann seine Emissionen auf eine Weise reduzieren würde, die sich international nicht hochskalieren ließe. Würden alle Länder ebenfalls in hohem Maße auf Biomasse setzen, könnte dies das globale Potential überschreiten. Insofern muss sich der Biomasseimport auf eine Höhe beschränken, die mit einer weltweiten Dekarbonisierung, die mit einer insgesamt hohen Nachfrage nach Biomasse verbunden ist, kompatibel bleibt.

Für die Langfristszenarien wurde grundsätzlich festgelegt, dass Deutschland Biomasse maximal in der Höhe von 30 % seines inländischen Potentials zusätzlich importieren kann, so dass in der Summe ca. 400 TWh<sub>therm</sub>/a zur Verfügung stehen<sup>10</sup>. Für die Betrachtung ambitionierterer Ziele erscheint es aber notwendig, diese Größe im Kontext globaler Dekarbonisierungsbemühungen genauer abzuschätzen. **Die insgesamt zur Verfügung stehende Biomasse ist für viele Bereiche eine zentrale Kenngröße.** Sie entscheidet vielfach darüber, ob ein Bereich über Biomasse oder über gänzlich andere Techniken, die vielfach erst noch entwickelt und erprobt werden müssen, dekarbonisiert wird. Eine zeitnahe Abschätzung der Größe erscheint daher zur Erstellung einer Gesamtstrategie notwendig, sollten sehr ambitionierte Ziele verfolgt werden.

**Kernfrage 3:** Welche Mengen Biomasse stehen, auch durch Importe, für die energetische Nutzung zu Verfügung?

---

<sup>10</sup> Diese Annahme wird in einem der weiteren Szenarien variiert, um die Auswirkungen einer höheren oder niedrigeren Biomasseverfügbarkeit auf das System zu untersuchen.

### Wie setzt sich Deutschlands Biomassepotential in den Langfristszenarien<sup>11</sup> zusammen?

Bei der Abschätzung des verfügbaren Biomassepotentials werden meist drei Bereiche unterschieden:

**In Deutschland angebaute Biomasse:** Das Potential der angebauten Biomasse wurde auf Basis der verfügbaren Flächenpotentiale und dem spezifischen Energieertrag abgeschätzt. Es wird angenommen, dass das Flächenpotential von 2,0 Mio. ha im Jahre 2010 bis auf 2,6 Mio. ha im Jahr 2050 steigt. Der spezifische Energieertrag steigt von 26,4 MWh pro Hektar im Jahr 2010 durch Anbauverbesserungen und Umstellung auf ertragreichere Pflanzen bis auf 40,6 MWh pro Hektar (Eigene Berechnungen des IFEU).

**Rest- und Abfallstoffe:** Hier handelt es sich um Reststoffe (Koppelprodukte) aus der Land- und Forstwirtschaft (z. B. Gülle, Reststroh oder Waldrestholz), Reststoffe (Koppelprodukten) aus der Biomasse verarbeitenden Industrie (Lebensmittel-, Holz-, Papier- und Möbelindustrie) sowie Abfallstoffe. Die Analyse von verschiedenen Studien ergibt für 2050 einen Korridor von 183 TWh bis 250 TWh. Im Basisszenario der Langfristszenarien wird die Entwicklung des Szenarios „Naturschutz Plus“ übernommen, die im Jahr 2050 ein Potential von 201 TWh unterstellt [Nitsch et al. 2004b].

**Biomasse-Importe:** Die Frage der Höhe des Potentials für Importe nachhaltig produzierter Biomasse ist sehr umstritten. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der Tatsache, dass Deutschland bereits durch Futtermittelimporte einen Flächenfußabdruck im Ausland besitzt. Die untersuchten Studien schwanken in ihren Annahmen zwischen 0 TWh (1. Iteration „Klimaszenario 2050“, Szenario „2GS“ und 250 TWh [Kirchner et al. 2009]. Im Rahmen der Langfristszenarien wird ein Mittelweg gewählt und angenommen, dass ca. 30 % der national verfügbaren Biomasse (Summe aus Anbaubiomasse und Reststoffen) importiert werden kann.

Kategorie	2010	2050	Einheit
Anbaubiomasse	53	105	TWh/a
Rest- u. Abfallstoffe	188	201	TWh/a
Importe	72	92	TWh/a
<b>Summe</b>	<b>313</b>	<b>398</b>	<b>TWh/a</b>

<sup>11</sup> Eine kurze Erläuterung zum Hintergrund und Ziel des Projekts „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ wird im Berichtsmodul 1 des Projekts dargelegt.

## 2.5.2 Sollen bzw. müssen aus Strom sekundäre Energieträger erzeugt werden?

Wie in Arbeitshypothese 3 festgestellt wurde, dürfen im Falle einer vollständigen Dekarbonisierung nur noch emissionsfreie Energieträger zum Einsatz kommen. Nachfrage, die nicht lokal durch solche Energieträger wie Biomasse oder Solarthermie gedeckt wird, muss über sekundäre Energieträger aus dem Umwandlungssektor gedeckt werden. Dabei gibt es drei unterschiedliche Optionen: Entweder kann Strom direkt genutzt werden, oder Strom muss in andere sekundäre Energieträger umgewandelt werden, entweder in Wasserstoff oder in Kohlenwasserstoffe. Ein Vergleich der Merkmale dieser Optionen ist in Tabelle 1 dargestellt. Der Vergleich lässt mehrere Rückschlüsse für die mögliche Bedeutung der Energieträger im Fall einer vollständigen Dekarbonisierung zu.

**Generell ist eine direkte Nutzung von Strom allein aus Effizienzgründen (technisch und ökonomisch) in vielen Fällen die vorzuziehende Option.** Sie reduziert den Bedarf an EE-Stromerzeugern und vermeidet dadurch unnötige Mehrkosten und ggf. Akzeptanzprobleme. Diese Annahme führt zu einer weiteren Arbeitshypothese im weiteren Vorgehen:

**Arbeitshypothese 4:** Sollten die technischen Randbedingungen, insbesondere die Gewährleistung von ausreichend Flexibilität, dies zulassen, ist es aus Gründen der ökonomischen und technischen Effizienz vorteilhaft, Strom direkt zur Versorgung der Nachfrage zu nutzen.

Für die 80%ige Reduktion im Basisszenario der Langfristszenarien reicht dieser Pfad aus; Wasserstoff und strombasierte Kohlenwasserstoffe werden nicht benötigt, da in einigen kritischen Bereichen noch auf konventionelle Brennstoffe zurückgegriffen werden kann. Diese Option steht im Falle einer 95%igen Reduktion nicht mehr zur Verfügung. **Der Einsatz von Strom lässt sich aus verschiedenen Gründen eventuell nicht beliebig weit ausdehnen.** Hemmnisse sind hier u.a. Anforderungen an die Systemflexibilität sowie Akzeptanzprobleme beim Netzausbau, aber auch technische Anforderungen bei manchen Industrieprozessen. Eine weitere Kernfrage lautet daher:

**Kernfrage 4:** Wie viel und welche Nachfrage kann allein aus Strom gedeckt werden, bis die Bereitstellung von Flexibilität so teuer wird, dass Wasserstoff und / oder strombasierte Kohlenwasserstoffe genutzt werden sollten?

Sollte es nicht möglich oder zu kostspielig sein, die gesamte nicht lokal gedeckte Nachfrage über Strom (und netzgebundene Wärme) bereit zu stellen, stellt sich die Frage, welcher sekundäre Brennstoff bzw. welche Kombination eingesetzt werden soll. Der einfache Vergleich in Tabelle 1 liefert hier keine eindeutige Antwort. Wasserstoff und aus Strom erzeugte Kohlenwasserstoffe haben jeweils bestimmte Vor- und Nachteile. Das größte Hindernis für den Einsatz von Wasserstoff ist der notwendige Aufbau der Infrastruktur. Für strombasierte Kohlenwasserstoffe scheinen die hohen wirkungsgradbedingten Verluste und die daraus resultierenden hohen Kosten auf den ersten Blick die größten Hürden zu sein. In der Umsetzung wird aber die Herkunft des dafür notwendigen CO<sub>2</sub> ein noch größeres Hindernis darstellen. Um dies zu verdeutlichen soll im folgenden Abschnitt das Potential für strombasierte Kohlenwasserstoffe am Beispiel von EE-Methan abgeschätzt werden.

Des Weiteren ist zu bedenken, dass der optimale Energiemix „Sprungstellen“ aufweist. Es ist z.B. möglicherweise nicht sinnvoll, sowohl die notwendige Infrastruktur für Wasserstoff als auch strombasierte Kohlenwasserstoffe parallel auszubauen. Zusätzlich könnte es beispielweise günstiger sein, dass das ganze Energiesystem im Sinne einer „Wasserstoffwirtschaft“ umzustellen, wenn ohnehin in vielen Bereichen auf Wasserstoff zurückgegriffen werden muss. Aus Systemeffizienzgründen könnte dann sogar weniger Strom direkt genutzt werden, als dies rein technisch möglich wäre.

Tabelle 1: Vergleich der Vor- und Nachteile der sekundären EE-Energieträger

	Direkte Stromnutzung <sup>12</sup>	Wasserstoff	Strombasierte Kohlenwasserstoffe
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technisch effizientester Pfad</li> <li>• In vielen Fällen günstig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technisch effizienter als Kohlenwasserstoffe</li> <li>• Speicherbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infrastruktur in Teilen vorhanden</li> <li>• Vorhandene Speicher können genutzt werden</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nötiger Ausbau Netz- und ggf. Speicherinfrastruktur</li> <li>• Bei hohen Anteilen fluktuierender EE ist Ausbau der Flexibilitätsmaßnahmen inkl. Speicher notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Komplexe und teure Umstellung der Infrastruktur</li> <li>• Starke Pfadabhängigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub>-Input notwendig</li> <li>• Potentiale für „bilanzneutrales“ CO<sub>2</sub> für die Methanisierung stark beschränkt</li> <li>• Teuer (Vermeidungskosten über 500 EUR/t)</li> <li>• Ineffizienteste der drei Optionen (höchste Verluste)</li> </ul>
<b>Effizienz heute<sup>13</sup></b>	~95 %	~67 %	~50 % <sup>14</sup>
<b>Kosten heute<sup>15</sup></b>	70 EUR/MWh	148 EUR/MWh	221-321 EUR/MWh
<b>Effizienz 2050<sup>13</sup></b>	95 %	67-87 %	50-74 % <sup>14</sup>
<b>Kosten 2050<sup>15</sup></b>	50 EUR/MWh	74-118 EUR/MWh	97-281 EUR/MWh

<sup>12</sup> Im engeren Sinne ist Strom kein Energieträger, da es sich nicht um einen Stoff handelt. Zur Vereinfachung wird er hier und in anderen Quellen als ein solcher geführt.

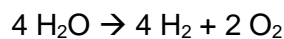
<sup>13</sup> EE-Strom zu Endenergie (ohne Speicher, sonst ggf. weitere Verluste).

<sup>14</sup> Der Energieaufwand der CO<sub>2</sub>-Erzeugung/Bereitstellung ist im angegebenen Wirkungsgrad nicht berücksichtigt.

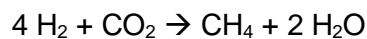
### 2.5.3 Potentialabschätzung EE-Methan

Strombasierte Kohlenwasserstoffe haben gegenüber Wasserstoff den großen Vorteil, dass auf eine **existierende Speicher- und Transportinfrastruktur** zurückgegriffen werden kann. Somit könnten Nachfragesektoren praktisch von außen ohne Änderungen an den intern verwendeten Technologien dekarbonisiert werden. Ein Industriestandort würde beispielweise statt mit Erdgas mit EE-Methan versorgt und wäre somit auf den ersten Blick ohne Änderungen der Prozesse dekarbonisiert. **Ein Problem liegt jedoch in der Herkunft des für das EE-Methan notwendigen CO<sub>2</sub>**, wie im Folgenden dargestellt werden soll. Es erfolgt jedoch keine ausführliche Darstellung des Verfahrens; es sollen lediglich die Grundsätze soweit dargestellt werden, dass ersichtlich wird, warum EE-Methan nur über ein stark begrenztes Potential verfügt. Diese sowie weitere Schwierigkeiten sind unter anderem in [Hermann et al. 2014] detaillierter dargelegt.

Die Herstellung von EE-Methan ist ein zweistufiges Verfahren, das z.B. in [UBA 2014] dargestellt ist. Zunächst erfolgt die Wasserstoffsynthese:



Der Prozess ist endotherm und hat aktuell einen Wirkungsgrad von ungefähr 67 % (67-87 % in 2050). Danach erfolgt die Methanisierung:



- 
- 15 Kosten durch Erzeugung und Umwandlung je MWh Endenergie. Durch die Umwandlung in Nutzenergie entstehen bei Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen noch einmal höhere Verluste als bei Strom. Des Weiteren sind die nachfrageseitigen Investitionen zu bedenken, die je nach Anwendung sehr unterschiedlich ausfallen können und daher hier nicht mit einbezogen werden. Annahmen Elektrolyseur heute (in Klammern: Abschätzung für 2050): Spezifische Investitionen 1.000 EUR/kW (500-1.000 EUR/kW) ([Hermann et al. 2014]), kalkulatorischer Zins 6 %, 3 % O&M, technische Lebensdauer 20 Jahre, 4.000 Volllaststunden pro Jahr, Wirkungsgrade Elektrolyseur aus ([Smolinka et al. 2011]). Hier wird von der bereits etablierten alkalischen Elektrolyse und ihrer prognostizierten Weiterentwicklung ausgegangen. In der Entwicklung begriffene alternative Elektrolyseverfahren werden aufgrund derzeit unzureichender Datenbasis außenvorgelassen. Annahmen Methanisierung heute (in 2050): Spezifische Investitionen 600 EUR/kW (130-600 EUR/kW) ([Götz et al. 2016]), 3 % O&M, technische Lebensdauer 20 Jahre, 4.000 Volllaststunden pro Jahr, Kosten CO<sub>2</sub>-Input: 30-530 EUR/t ([Lackner 2009]; [APS 2011]), Wirkungsgrad Methanisierung: 75 % (75-85 %) ([Hermann et al. 2014]). Insgesamt existiert in der Literatur große Unsicherheit bezüglich der ökonomischen Kenngrößen der Methanisierungseinheit; insbesondere die Werte für die spezifischen Investitionen sowie die CO<sub>2</sub>-Kosten weisen große Bandbreiten auf.

Diese verläuft exotherm mit einem Wirkungsgrad von heute ca. 75 % (75-85 % in 2050). Ohne Berücksichtigung des Energieaufwandes für die CO<sub>2</sub>-Bereitstellung liegt der Gesamtwirkungsgrad heute also bei 50 % (50-74 % in 2050) von Strom zu EE-Methan. Es wird an Verfahren zur Hochtemperaturelektrolyse geforscht, bei denen die Abwärme der Methanisierung als Energieinput in der Elektrolyse verwendet wird. Bei diesen Verfahren sollen deutlich höhere Systemwirkungsgrade erreicht werden. Dies würde das vielfach zitierte Problem der mangelnden Effizienz des Prozesses deutlich reduzieren. Insbesondere die aktuell geringe technische Lebensdauer der Hochtemperaturelektrolyse muss dabei jedoch verbessert werden, damit sie sich gegenüber den etablierten Verfahren durchsetzen kann.

Insgesamt weisen die technischen und ökonomischen Kenngrößen der einzelnen Erzeugungskomponenten, wie Lebensdauer, Wirkungsgrad und spezifischen Investitionen, große Spannbreiten in der Literatur auf (vgl. Tabelle 1). Die resultierende Unsicherheit bezüglich der Entwicklungspotentiale von EE-Methan werden durch die Bandbreiten der Gestehungskosten abgebildet, von aktuell 221 bis 321 EUR/MWh, bzw. 97 bis 281 EUR/MWh in 2050.

**Das eigentliche Kernproblem der strombasierten Kohlenwasserstoffe liegt jedoch in der Bereitstellung des CO<sub>2</sub>.** Pro MWh<sub>th</sub> EE-Methan werden 200 kg CO<sub>2</sub> benötigt. Für 100 TWh EE-Methan müssen also 20 Mt CO<sub>2</sub> bereitgestellt werden. Ob das erzeugte Methan wirklich klimaneutral ist, hängt davon ab, woher dieses CO<sub>2</sub> stammt.

Zunächst soll dabei der Sonderfall der Kreislaufwirtschaft betrachtet werden. Bei dieser wird das eingesetzte CO<sub>2</sub> bei der Verbrennung abgeschieden und dann wieder in der Methanisierung eingesetzt. Die Herkunft des CO<sub>2</sub> spielt dann keine große Rolle, da es ohnehin nicht in die Atmosphäre gelangt.

Prinzipiell muss beim Einsatz von EE-Methan zwischen zwei Pfaden unterschieden werden:

- **Stationärer, großskaliger Einsatz** (Kraftwerke, Speicher etc.): Hier ist eine CO<sub>2</sub>-Kreislaufwirtschaft möglich. Werden die Emissionen abgeschieden und wieder zur Methanisierung genutzt, entstehen keine klimawirksamen Emissionen. Das Potential für diese Option ist jedoch gering. Sie stellt eine Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-freien Stromerzeugung dar, ist durch Infrastrukturbedarf und Umwandlungsverluste jedoch sehr teuer. Ein gewisses Potential besteht ggf. zur Spitzenlastdeckung, die Kosten liegen aber sehr viel höher als beispielweise bei einer Deckung der Spitzenlast über Biogasturbinen.

- **Nicht-stationärer oder kleinskaliger Einsatz** (Verkehr, kleine Dörfer oder Einzelgebäude etc.): Hier gelangen die Emissionen des EE-Methans bei ihrem Einsatz in die Atmosphäre.

Der nicht-stationäre Einsatz von strombasierten Kohlenwasserstoffen ist für eine 95%ige Reduktion besonders relevant. Hier können die Brennstoffe in Bereichen eingesetzt werden, in denen kaum Alternativen vorhanden sind, z.B. im Flugverkehr, in Lastkraftwagen (LKW) oder zur Beheizung von Gebäuden mit unzureichenden EE-Optionen. **Im dezentralen Einsatz ist die Herkunft des CO<sub>2</sub> aber von großer Bedeutung, da es dort nicht aufgefangen werden kann und in die Atmosphäre gelangt.** Unter Klimabilanzgesichtspunkten müssen wiederum zwei Arten von CO<sub>2</sub> unterscheiden werden:

- **Bilanzneutrales CO<sub>2</sub>**, also CO<sub>2</sub>, das vorher der Atmosphäre entzogen wurde. Dabei existieren zwei Optionen:
  - **Biogenes CO<sub>2</sub> als Abgas**, z.B. aus der Biogasaufbereitung, der Bioethanolproduktion sowie aus dem stationären Biomasseeinsatz. Wie viel CO<sub>2</sub> abgeschieden und verwendet werden kann, hängt stark von der Ausgestaltung des Energiesystems ab. Wird kaum noch Biomasse in stationären Anlagen eingesetzt, weil es im Flugverkehr und anderen dezentralen Anwendungen genutzt wird, steht auch weniger CO<sub>2</sub> zur Abscheidung zu Verfügung. Ohne hier bereits eine detaillierte Abschätzung vorzunehmen, erscheint es nicht plausibel, dass über diese Option mehr als 15 Mt in 2050 bereitgestellt werden können.
  - **Aus der Luft abgeschiedenes CO<sub>2</sub>**, wobei die gleichen Verfahren zum Einsatz kommen, die in Abschnitt 2.4.2 diskutiert wurden. Daher besteht hier auch das gleiche Problem, nämlich die sehr hohen Kosten des abgeschiedenen CO<sub>2</sub>. Selbst eher optimistische Kostenabschätzungen von 150-320 EUR/t CO<sub>2</sub> (IWES 2012) führen zu CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von EE-Methan von deutlich über 500 EUR/t<sup>16</sup>. Da aber die anderen Quellen für bilanzneutrales CO<sub>2</sub> über ein beschränktes Potential verfügen, muss bei großen Nachfragen nach strombasierten Kohlenwasserstoffen auf Luftabscheidung zurückgegriffen werden. Das Umweltbundesamt kommt ebenfalls zu diesem Schluss: *„Langfristig ist davon auszugehen, dass [...] nur über Luftzerlegung aus der Atmosphäre ausreichend CO<sub>2</sub> bereitgestellt und der Kohlenstoffkreislauf geschlossen werden kann.“* [UBA 2016]

---

<sup>16</sup> Sehr optimistische Kostenabschätzungen gehen sogar von 30 EUR/t CO<sub>2</sub> [Lackner 2009] aus.



- Bei **bilanzwirksamem CO<sub>2</sub>** stammt das CO<sub>2</sub> mehr oder weniger direkt aus fossilen Brennstoffen, welches über Umwegen doch in die Atmosphäre gelangt. Es sind zwei wesentliche Quellen denkbar:
  - **CO<sub>2</sub> aus Prozessemissionen**, wobei CO<sub>2</sub>, welches in Prozessen anfällt, entweder nicht vermieden werden kann oder in Kauf genommen wird, um EE-Methan bereit zu stellen. Das Umweltbundesamt (UBA) schätzt das Potential dieser Option im Falle einer vollständigen Dekarbonisierung auf 13,7 Mt (UBA 2013).
  - **CO<sub>2</sub> aus fossilen Brennstoffen**, welches bei der Verbrennung abgeschieden und dann für die Methanisierung genutzt wird. Da dieser Pfad bilanzwirksam ist, ist das Potential naturgemäß stark beschränkt.

**Dabei ist es wichtig zu verstehen, dass EE-Methan mit bilanzwirksamem CO<sub>2</sub> sich am Ende der Nutzungskette genau wie Methan verhält.** Im Grund handelt es sich um eine „Doppelnutzung“ des CO<sub>2</sub>. Fossile Brennstoffe werden zunächst in einer bestimmten Form genutzt, als Brennstoff oder in Prozessen; aus dem anfallenden CO<sub>2</sub> wird ein zweites Mal ein Brennstoff erzeugt und dieser dann (wenn keine Kreislaufwirtschaft erfolgt) in die Atmosphäre emittiert. Dies ist zwar aus Klimaperspektive weniger schädlich als eine nur einfache Nutzung, aber es ist trotzdem nicht klimaneutral. Werden beispielweise die in [UBA 2013] berechneten 13,7 Mt komplett genutzt, können daraus, zu sehr hohen Kosten, 68,5 TWh Methan erzeugt werden. Der Begriff „EE-Methan“ ist hier aber irreführend, da die 13,7 Mt in die Atmosphäre gelangen und dort klimawirksam werden.

Auch für einen Import von EE-basierten Kohlenwasserstoffen, der gelegentlich diskutiert wird, gelten die gleichen Einschränkungen. Letzten Endes steht darüber wieder die Kernfrage 1, inwieweit andere Länder das gleiche Ambitionsniveau verfolgen. Wird im Rest der Welt ebenfalls eine ambitionierte Klimapolitik betrieben, müssen auch dort die CO<sub>2</sub>-Ströme reduziert werden. Möchte Deutschland eine Vorreiterrolle einnehmen, erscheint es wenig sinnvoll, das System stark darauf auszurichten, dass in anderen Ländern weiter CO<sub>2</sub> anfällt, welches dann am Ende der Kette in Deutschland emittiert wird.

Aus den oben genannten Überlegungen leitet sich die folgende Vereinfachung für die Überlegungen ab:

**Arbeitshypothese 5:** Für EE-basierte Kohlenwasserstoffe stehen in Deutschland in 2050 maximal 15 Mt CO<sub>2</sub> zu Verfügung. Der aus Prozessemissionen stammende Teil ist nicht bilanzneutral. Das Potential für bilanzneutrales, nicht in Kreisläufen eingesetztes EE-Methan ist auf max. 45 TWh beschränkt.

Ob das Potential für bilanzneutrales EE-Methan tatsächlich genutzt werden sollte, muss jedoch geprüft werden. Zu beachten sind dabei insbesondere die Kostenaspekte und die Frage, ob diese Menge neben der Stromdirektnutzung bereits ausreicht, um die Nachfragesektoren zu versorgen. Sollte letzteres nicht der Fall sein, ist es aufgrund von Skaleneffekten ggf. sinnvoller, das Energiesystem in Richtung einer Wasserstoffwirtschaft umzubauen. Diese hat ggü. der Nutzung von strombasierten Kohlenwasserstoffen den Vorteil, dass sie nicht auf die permanente Bereitstellung von CO<sub>2</sub> angewiesen ist, die mit einer 95%igen Reduktion letzten Endes nicht gut vereinbar ist. Sollte EE-Methan nicht in großen Mengen eingespeist oder genutzt werden und Erdgas (zumindest ohne CCS) 2050 nicht mehr eingesetzt werden, besteht perspektivisch kein Bedarf für eine Gasinfrastruktur wie sie heute vorliegt.

## 2.6 Wie hoch muss der CO<sub>2</sub>-Preis sein?

Die vollständige Reduktion der energetischen Emissionen ist der zentrale Bestandteil einer vollständigen Dekarbonisierung. Wie bereits dargestellt wurde, ist das Emissionsbudget der energetischen Emission in 2050 so gering, dass es für die Diskussion eine zweckmäßige Vereinfachung ist, davon auszugehen, dass fossile Energieträger bis 2050 vollständig aus dem System verbannt werden müssen. **Dies entspricht einer Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises auf „unendlich“ bzw. auf denjenigen Preis, bei dem auch die letzte Anwendung auf den Einsatz fossiler Brennstoffe verzichtet.** Wie hoch dieser Preis ist, ist schwer vorherzusagen. Klar ist jedoch, dass er in Bereichen liegt, die nach heutigem Verständnis als sehr hoch anzusehen sind.

Ein Beispiel aus dem Verkehrssektor soll dies verdeutlichen. Für einen Personenkraftwagen (PKW) mit einer Jahresfahrleistung von 10.000 km und einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 80g/km bedeutet ein CO<sub>2</sub>-Preis von 500 EUR/t eine Mehrbelastung von 400 EUR/Jahr. Beim LKW-Transport verursacht der gleiche CO<sub>2</sub>-Preis Mehrkosten von 100 EUR für eine Ladung von einer Tonne über 1.000 km. Sowohl für den PKW als auch für den LKW sind dies zwar substantielle Pönalen, die aber

ohne weitere Maßnahmen vermutlich nicht ausreichen, um fossile Kraftstoffe vollständig aus dem Verkehr zu verdrängen.

**Dabei ist zu berücksichtigen, dass für jede einzelne Anwendung nur der CO<sub>2</sub>-Preis relevant ist, bei dem sie vollständig dekarbonisiert wird:** Lohnt es sich z.B. für einen bestimmten Industrieprozess ab einem CO<sub>2</sub>-Preis von 50 EUR/t auf ein CO<sub>2</sub>-freies Verfahren zu wechseln, ist es für diesen Prozess irrelevant, ob die Grenzvermeidungskosten Deutschlands danach auf 500 EUR/t ansteigen. Da der Prozess bereits dekarbonisiert ist, müssen auch keine CO<sub>2</sub>-Zertifikate erworben werden. Sehr hohe CO<sub>2</sub>-Preise suggerieren auf den ersten Blick auch insgesamt hohe Vermeidungskosten, während für die durch die Dekarbonisierung entstehenden Kosten die Summe der individuellen Vermeidungskosten zu betrachten ist. Der marginale CO<sub>2</sub>-Preis ist insofern ein nur begrenzt aussagekräftiger Indikator für die Betrachtung extremer Reduktionsszenarien, da er nur eine Abschätzung der Kosten der teuersten Vermeidungsmaßnahme darstellt. Für die Bewertung der Gesamtkosten ist die Angabe der Durchschnittskosten aussagekräftiger.

## 2.7 Strategiewahl als Frage der Akzeptanz und des gesellschaftlichen Konsenses

Die Darstellungen in den vorherigen Abschnitten verdeutlichen eine grundsätzliche Herausforderung: **Eine vollständige Dekarbonisierung ist ein sehr ambitioniertes Unterfangen**, unabhängig davon, ob es innerhalb der nächsten 35 Jahre oder etwas später umgesetzt werden soll. Aus einer rein technischen Perspektive ist der Transformationsprozess realisierbar; das zeigen sowohl die bereits erwähnten Studien [Repenning et al. 2015; UBA 2014] als auch die Betrachtungen in diesem Papier. Neben den teilweise existierenden technischen Herausforderungen wird **die zentrale Hürde aber darin bestehen, Akzeptanz für ein derart ambitioniertes Ziel und die dafür notwendigen Schritte zu erzielen.**

Die vollständige Dekarbonisierung erfordert in allen Bereichen Maßnahmen, welche zum einen mit hohen ökonomischen Kosten verbunden sind und zum anderen viele Aspekte berühren, in denen die Akzeptanz der Bürger und Unternehmen nicht als selbstverständlich gelten kann. Steigende Energiekosten, Netzausbau, weitreichende ordnungsrechtliche Eingriffe in die Bereiche Wohnen, Industrie und Mobilität bis hin zu Bemühungen, die Ernährung nachhaltiger zu gestalten, sind nur Beispiele, für welche Art von Änderungen politische und gesellschaftliche Akzeptanz gefunden werden muss.

**Dabei ist zu beachten, dass die Transformation ein stark vernetztes System betrifft, das sich wie kommunizierende Röhren verhält;** gelingt es in einem Sektor oder Teilbereich nicht, bestimmte Änderungen anzureizen oder durchzusetzen, erhöht dies den Druck in anderen Bereichen. Monetäre Aspekte und Akzeptanz sind dabei in gewisser Weise zwei Seiten der gleichen Medaille. **Akzeptanz ist in gewisser Weise die „Währung“ des Transformationsprozesses.** Werden beispielweise teure Stromspeicher eingesetzt um Netzausbau zu vermeiden, muss auf der andere Seite Akzeptanz für die vom Verbraucher oder Bürger zu tragenden Mehrkosten dieser Maßnahme geschaffen werden. Eine Maßnahme, die die Akzeptanz in einem bestimmten Aspekt erhöht, wird häufig in anderen Bereichen zu höheren Belastungen führen.

Dieses Problem verdeutlicht auch, warum ein konkreter Vorschlag für einen Pfad zur vollständigen Dekarbonisierung, also einem 95%-Szenario, ungleich schwieriger zu erstellen ist als ein Pfad für eine 80%ige Reduktion der Treibhausgase. Letztere lässt sich weitestgehend mit Maßnahmen bestreiten, die in gewisser Weise schon erprobt sind. Auch dieser Transformationsprozess ist eine Herausforderung, aber die dafür notwendigen „Werkzeuge“ sind bekannt. **Für die vollständige Dekarbonisierung muss hingegen häufig eine Abwägung zwischen unterschiedlichen Technologien und Maßnahmen erfolgen, die heute in der Praxis nicht oder kaum eingesetzt werden** und bei denen unklar ist, inwieweit die Unternehmen und Bürger bereit sind, die dafür notwendigen Änderungen und Mehrkosten in Kauf zu nehmen. **Ein konkreter Pfad für eine umsetzbare Strategie der vollständigen Dekarbonisierung muss das Ergebnis einer gesellschaftlichen und politischen Konsensfindung sein.** In den folgenden Abschnitten wird nicht versucht, diesen Prozess vorwegzunehmen und eine konkrete Strategie für die einzelnen Sektoren und Bereiche vorzuschlagen. Das Ziel der Betrachtungen ist es aufzuzeigen, innerhalb welcher Grenzen der Transformationsprozess stattfinden kann und was die zentralen Einflussgrößen und Hemmnisse sind. Dabei sollte das Prinzip der kommunizierenden Röhren beachtet werden.

### 3 Energetische Emissionen

#### **Das Basisszenario des Projekts „Langfristszenarien“**

In dem Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ werden unterschiedliche Szenarien modellbasiert entwickelt und analysiert. Das Basisszenario stellt dabei das zentrale Szenario dar: In ihm wird der kosteneffiziente Weg gesucht, um die energie- und klimapolitischen Ziele Deutschlands zu erreichen. Im Folgenden wird an vielen Stellen auf Ergebnisse des Basisszenarios als Bezugspunkt verwiesen. Die Entwicklungen der Sektoren sind jeweils in den Abschnitten „Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands“ zusammengefasst. Zur besseren Einordnung des Szenarios sollen im Folgenden einige zentrale Eckpunkte des Basisszenarios dargestellt werden. Dabei sollte beachtet werden, dass es unterschiedliche Wege gibt, eine 80%ige Dekarbonisierung zu erreichen. In einigen wesentlichen Punkten wie der Bedeutung von Energieeffizienz und dem verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien sind sich jedoch alle Studien einig.

Das Basisszenario stellt weder eine Prognose noch eine konkrete Empfehlung dar. Ziel des Szenarios ist es, zu untersuchen, wie Deutschland seine energie- und klimapolitischen Ziele zu den geringsten ökonomischen Kosten erreichen kann. Der optimierende Charakter des Szenarios führt dabei in einigen Bereichen zu pointierten Entscheidungen für oder gegen bestimmte Optionen. Einige wenige Technologien, wie z.B. Aufdach-PV-Anlagen, werden aber in Anerkennung existierender politischer Entscheidung unabhängig von ihrer ökonomischen Vorteilhaftigkeit eingesetzt.

In allen Sektoren werden nahezu ausschließlich etablierte Technologien eingesetzt. In bestimmten Bereichen werden kontinuierliche Weiterentwicklungen abgebildet, wie z.B. eine Erhöhung der maximalen Nabenhöhe von Windenergieanlagen auf bis zu 160 m. Eine Ausnahme stellt CCS dar, welches derzeit noch nicht in industriellem Maßstab erprobt ist. Die Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> kommt im Basisszenario in bestimmten Industrieprozessen zum Einsatz. Im Stromsektor ist CCS aus Akzeptanzgründen dagegen nicht verfügbar.

Das Szenario ist in der Industrie, im Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD)-Sektor, im Verkehr und in privaten Haushalten durch verstärkte Effizienzmaßnahmen und eine starke Diffusion emissionsarmer Technologien insbesondere den Einsatz Erneuerbarer Energien geprägt.

In der Energiebereitstellung des Umwandlungssektors kommen im Strombereich Erneuerbare Energien, insbesondere Windenergie an Land zum Einsatz. Im Nah- und Fernwärmebereich wird verstärkt Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt, in späteren Jahren auch Power-to-heat.

Zur Analyse der Herausforderungen der vollständigen Dekarbonisierung des Energieverbrauchs Deutschlands soll im Folgenden eine sektorale Betrachtung durchgeführt werden. Die größten Herausforderungen stellen die Bereiche dar,

- die auch in einem 80-%-Szenario noch einen deutlichen Einsatz konventioneller Brennstoffe aufweisen und/oder
- in denen ein Umstieg auf (EE-)Strom schwierig ist.

Das Basisszenario der Langfristszenarien erreicht eine 80%ige Dekarbonisierung Deutschlands.<sup>17</sup> In allen Sektoren kommen auch in 2050 noch fossile Energieträger zum Einsatz. Diese „Restemissionen“ lassen Rückschlüsse darüber zu, in welchen Sektoren und Teilbereichen eine vollständige Beseitigung fossilen Energieeinsatzes mit großen Anstrengungen verbunden ist. Die Schlussfolgerungen decken sich in den meisten Punkten mit den Erkenntnissen anderer Szenariostudien zur langfristigen Dekarbonisierung. Die grundsätzlichen Herausforderungen stellen sich wie folgt dar:

- **Umwandlungssektor:** Für eine CO<sub>2</sub>-Neutralität des Stromsektors liegen aus einer Vielzahl an Szenariostudien bereits Konzepte vor, die im Wesentlichen auch mit heute bereits existierenden Technologien umsetzbar sind. Allerdings muss angemerkt werden, dass ein Großteil der Studien eher eine 80%ige Reduktion von Treibhausgasen untersucht als noch ambitioniertere Ziele. Obwohl sich manche Konzepte übertragen lassen, entstehen bei einer vollständigen Dekarbonisierung neue Herausforderungen; diesen kann häufig nicht mit einer reinen Verstärkung der Optionen für eine 80%ige Reduktion begegnet werden. Dies basiert im Wesentlichen auf dem hohen Anteil nicht regelbarer Erneuerbarer Energien in den ambitionierten Vermeidungsszenarien. Weniger gut erforscht ist dahingegen die Frage, wie die Bereitstellung von netzgebundener Nah- und Fernwärme emissionsfrei erreicht werden kann.
- **Verkehrssektor:** Für einige Bereiche des Verkehrs erscheint es plausibel, dass diese durch technische Innovationen verhältnismäßig gut dekarbonisierbar sind. Dies gilt z.B. für den PKW-Verkehr, bei dem Elektromobilität bereits mittelfristig (bei CO<sub>2</sub>-freiem Strom) eine emissionsfreie Alternative darstellen kann. Deutlich höhere Hürden stellen sich dagegen bei LKW sowie insbesondere im Flug- und Schiffsverkehr, bei de-

---

<sup>17</sup> Das Reduktionsziel für 2050 wird übererfüllt. Dabei ist zu beachten, dass derzeit nicht endgültig geklärt ist, inwieweit der internationale Verkehr und LULUCF bei der Berechnung der Zielerreichung nach dem Energiekonzept berücksichtigt werden müssen.

nen es bisher kaum Aussichten auf Alternativen zu einem starken Biomasseeinsatz gibt. Dies bedeutet für die anderen Sektoren, dass für ihre Dekarbonisierung vermutlich deutlich weniger Biomasse zu Verfügung steht als im Fall einer 80%igen Dekarbonisierung.

- **Industriesektor:** Eine CO<sub>2</sub>-neutrale Industrie ist aus verschiedenen Gründen eine große Herausforderung. Zum einen werden für einige energieintensive Prozesse heute Verfahren eingesetzt, die den Einsatz fossiler Brennstoffe erfordern. Zum anderen erschweren häufig lange Lebensdauern der Anlagen und Herausforderungen in den Anpassungen von etablierten Prozessketten den Umstieg auf Strom oder Biomasse als Energieträger. Dies erfordert bereits zeitnah deutlich stärkere Anreize, als dies derzeit der Fall ist. Ohne diese besteht die Gefahr von „stranded assets“, wenn weiter auf Prozesse und Strukturen gesetzt wird, die fossile Brennstoffe erfordern und zu einem späteren Zeitpunkt aufwendig umgestellt werden müssen.
- **Gebäudewärme:** Während gerade im Neubau Nullenergiehäuser demnächst bereits Standard sind, erfordert eine vollständige Dekarbonisierung, dass auch im Bestand nur noch EE als Energieträger zum Einsatz kommen. Dies bedeutet eine vollständige Umstellung auf Strom, Solarthermie, Geothermie und Biomasse, wobei für letzteres das Potential insbesondere durch erhöhten Einsatz im Verkehrs- und ggf. auch Industriesektor beschränkt ist. Des Weiteren existiert eine Vielzahl an Gebäuden, bei denen eine tiefe energetische Sanierung mit hohem Aufwand und großen Kosten verbunden oder z.B. aus Gründen des Denkmalschutzes schwierig ist. Ohne eine gewisse Sanierungstiefe sind die Bedingungen für einen zweckmäßigen Einsatz von Alternativen zu fossilen Heizsystemen wie Wärmepumpen oder Solarthermie häufig nicht gegeben.

Die oben genannten Sektoren und Bereiche werden in den nächsten Abschnitten detaillierter dargestellt und Dekarbonisierungsoptionen diskutiert.

**Durch Haushaltsanwendungen und den Tertiärsektor verursachte Emissionen können durch höhere EE-Stromanteile technisch verhältnismäßig leicht reduziert werden.** Herausforderungen entstehen in diesen Sektoren hauptsächlich durch die ökonomischen Konsequenzen, d. h. durch die Mehrkosten und deren zweckmäßige und gerechte Verteilung und indirekt im Umwandlungssektor bei der EE-Integration.

## 4 Verkehrssektor

Der Verkehrssektor nimmt aus verschiedenen Gründen für die Entwicklung einer Strategie zur vollständigen Dekarbonisierung eine zentrale Rolle ein, weswegen er auch hier als erstes und in etwas größerer Tiefe als die anderen Sektoren diskutiert wird. Zum einen enthält der Sektor einige Bereiche, wie den Flug-, Schiffs- und Schwerlastverkehr, die große Mengen CO<sub>2</sub> ausstoßen und bei denen zur Emissionsreduktion bisher kaum Alternativen zu einem verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen oder PtL absehbar ist. Des Weiteren ist der Sektor eine wichtige „Keimzelle“ für die Frage, ob neben Strom (und begrenzten Mengen strombasierter Kohlenwasserstoff) Wasserstoff eine wichtige Rolle im Energiesystem spielen kann.

### 4.1 Status quo

Der Verkehrssektor hatte im Jahr 2014 eine Endenergienachfrage von 730 TWh, was ca. **34 % der gesamten Endenergienachfrage Deutschlands** entspricht. Abbildung 5 stellt die Struktur der Endenergienachfrage im Verkehr dar. Verkehr ist weiterhin stark von fossilen Kraftstoffen abhängig, im Wesentlichen basierend auf den Rohölprodukten Benzin, Diesel und Kerosin. Diese deckten im Jahr 2014 94 % der Endenergienachfrage. Strom wurde in 2014 fast ausschließlich im Schienenverkehr genutzt.

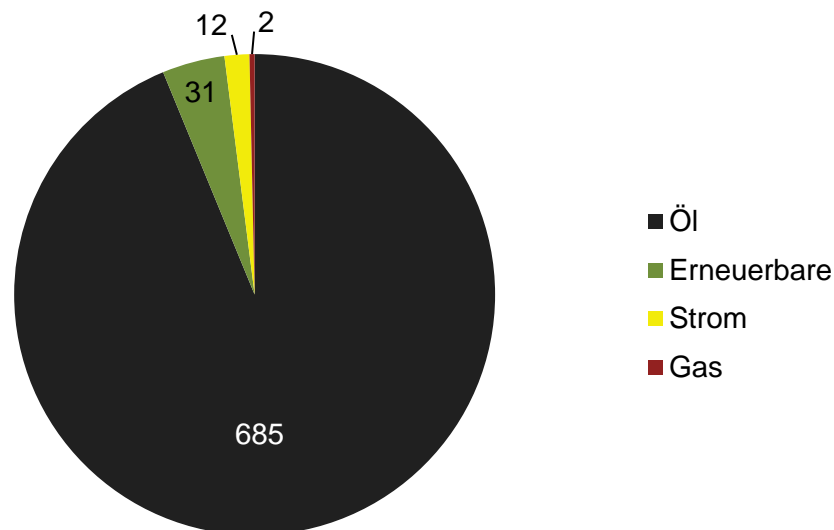
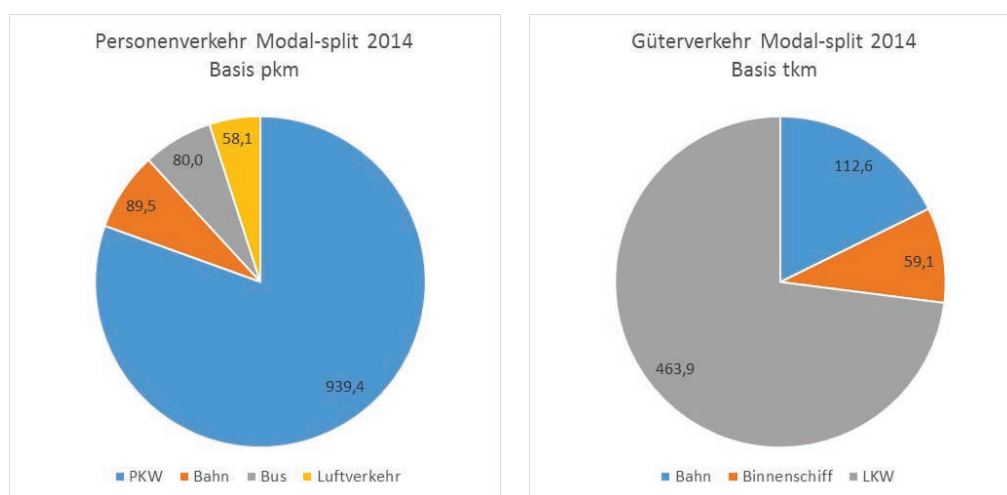


Abbildung 5: Energieverbrauch im Verkehr 2014 nach Energieträgern. Eigene Darstellung nach [BMW i 2017]



Abbildung 6 stellt die Aufteilung der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr für das Jahr 2014 dar. Im Personenverkehr dominiert der PKW mit über 80 %. Auf die Bahn entfallen knapp 8 % und den Bus knapp 7 %. Der Luftverkehr erfasst nur ausgewählte Flughäfen und ist daher nicht repräsentativ. Im Güterverkehr entfällt auf LKW ein Anteil von 73 %. Die Bahn erbringt knapp 18 % der Verkehrsleistung und das Binnenschiff gut 9 %.



Quelle: [BMVBS 2015]

Abbildung 6: Modal-split 2014 im Personen- und Güterverkehr

**Bis 2030 wird ein weiteres Wachstum der Verkehrsleistung erwartet.** Der Entwurf des Bundesverkehrswegeplan von März 2016 geht für den Personenverkehr von einem Wachstum der Verkehrsleistung von 2010 bis 2030 um +12,2 % aus [BMVI 2016]. Für den Güterverkehr beträgt das Wachstum der Transportleistung in Tonnenkilometern (tkm) sogar +38 % [iTP et al. 2014; BMVI 2016]. Damit wird im Personenverkehr nur noch moderates Wachstum erwartet, während im Güterverkehr weiterhin von einem starken Wachstum ausgegangen wird. Ebenfalls weiterhin starke Wachstumsraten der Verkehrsnachfrage werden für die internationalen Luft- und Schiffsverkehre erwartet.

Obwohl Energieverbrauch und Verkehrsleistung zunehmend voneinander entkoppelt sind, erscheint das Ziel, bis zum Jahr 2020 den Endenergieverbrauch ggü. 2005 um 10 % zu senken, ohne stringente kurzfristige Maßnahmen nicht erreichbar; im Jahr 2014 lag der Endenergieverbrauch des Verkehrs sogar 1,4 % über der Nachfrage in 2005 [BMW i 2015]. Auch die Maßnahmen im Aktionsprogramm Klimaschutz werden nicht ausreichen, um die deutliche Zielverfehlung in 2020 zu

verhindern. Dafür müssten stärkere Maßnahmen, wie ein deutlicher Anstieg der Mineralölsteuer oder ein Bonus-Malus-System für den PKW-Kauf, kurzfristig eingeführt werden [Schade und Krail 2015].

## **4.2 Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands**

Im Folgenden wird auf Modellergebnisse des Basisszenarios des Projekts „Langfristszenarien“ zurückgegriffen, die für den bodengebundenen Verkehr mit dem Modell *Astra* durchgeführt wurden. In diesem Szenario verbleibt von der gesamten Endenergienachfrage des Verkehrs von rund 400 TWh ein nichtregenerativer Primärenergieeinsatz von 103 TWh plus 65 TWh für Flug- und Seeverkehr, wovon über 95 % für den internationalen Verkehr anfallen. Im Verkehr werden ca. 138 TWh Biomasse sowie 96 TWh Strom eingesetzt. Des Weiteren werden bereits Oberleitungs-LKW genutzt. Dagegen ist für das Ambitionsniveau einer 80 % THG-Reduktion unter kostenminimaler Ausgestaltung des Szenarios der Einsatz von Wasserstoff im Verkehr nicht notwendig.

Die THG-Emissionen reduzieren sich bis 2050 auf rund 42 Mt CO<sub>2</sub> und liegen damit bei weniger als einem Viertel der heutigen Emissionen. Die niedrigen Ölpreise und die größer werdende Lücke zwischen realem Energieverbrauch und Verbrauch nach Typ-Zulassung von PKW sind allerdings bei den Berechnungen nicht berücksichtigt.

**Bis 2030 wird zum großen Teil die Verbesserung der Energieeffizienz zur Reduktion von Treibhausgasen im Verkehr beitragen.** Danach gewinnt die Nutzung alternativer Energieträger stetig an Bedeutung und führt sowohl zu weiterer moderater Steigerung der Energieeffizienz durch Elektrifizierung als auch zur deutlichen Verringerung der THG durch alternative Antriebe im Straßenverkehr. Hinzu kommt eine moderate Verlagerung von Verkehren auf die Schiene. Dies deckt sich mit Befunden größerer europäischer Projekte, die Reduktionen von bis zu -70 % THG abgeschätzt haben [Schade und Krail 2015; Skinner et al. 2010].

**Für eine 80%ige Reduktion bleibt die Anpassungsgeschwindigkeit des Verkehrssektors moderat.** Die Umstellung auf elektrifizierte Fahrzeuge kann über mehrere Fahrzeuggenerationen hinweg erfolgen und dürfte mit der Entwicklung verbesserter Batterien und dem Aufbau der Energieversorgungs- und Ladeinfrastruktur konsistent ablaufen. In schwierigen Bereichen kann noch auf fossile Kraftstoffe und ausreichend Biomasse mit entsprechender Quotierung zurückgegriffen werden. Dies gilt für den:

- Flugverkehr,
- Schiffsverkehr,
- Schwerlastverkehr auf der Straße außerhalb des Oberleitungsbereichs,
- Fahrten von Plug-in Hybridfahrzeugen, die die elektrische Reichweite überfordern.

### 4.3 Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, erfordert ein 95%-Szenario eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs bis 2050. **Das bedeutet, dass der Einsatz von fossilen Kraftstoffen im Verkehr nicht mehr möglich sein wird.** Damit entstehen vier Herausforderungen für den Verkehr in einem 95%-Szenario im Vergleich zu einer 80%igen Reduktion:

- **Erhöhung der Anpassungsgeschwindigkeit** unter Antizipation der Lebensdauer der Fahrzeuge.
- **Verdrängung** der verbliebenen fossilen Kraftstoffe.
- Notwendigkeit zur **Suffizienz** (z.B. Radverkehr, kurze Wege und Nutzungsmischung<sup>18</sup>).
- Ggf. Notwendigkeit zur **frühzeitigen Entscheidung** für und gegen einzelne Technologien.

Im Folgenden werden die Herausforderungen anhand von zwei Aspekten diskutiert:

- dem Angebot an vollständig dekarbonisierenden Energieträgern und
- den technischen Optionen der verschiedenen Verkehrsmittel zur Dekarbonisierung unter Berücksichtigung
  - der technischen Parameter (z.B. Energiebedarf, Verhältnis Nutzlast zu Antriebs- und Fahrzeuggewicht) und
  - der verkehrlichen Parameter (z.B. Reichweiten)

Abschließend werden diese beiden Aspekte miteinander verschränkt und Schlussfolgerungen abgeleitet.

Vier Energieträger können zur vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrs herangezogen werden:

---

<sup>18</sup> Mit Nutzungsmischung werden Gebäudestrukturen bezeichnet, die die Flächen für Wohnen und Gewerbe räumlich durchmischt und daher potentiell näher beieinander liegen („Stadt der kurzen Wege“).

- **Strom direkt** genutzt (Elektromotor mit Batterie).
- **Wasserstoff** aus erneuerbarem Strom (Elektromotor mit Brennstoffzelle).
- **Synthetische Kraftstoffe** aus erneuerbarem Strom (Verbrennungsmotor mit Power-to-Gas (PtG) oder Power-to-Liquid (PtL)).
- **Biomasse** (Verbrennungsmotor mit Biodiesel, Bioethanol, Biogas, Bio-LNG).

Dazu lassen sich auf der Seite des Energieangebotes zwei eindeutige Aussagen treffen:

- **Am energieeffizientesten ist die direkte Stromnutzung.** Häufig ist mit größerer Energieeffizienz auch eine bessere Kosteneffizienz verbunden. Die Stromdirektnutzung sollte daher den drei anderen Lösungen, sobald diese für einen Verkehrsträger realisierbar ist, grundsätzlich vorgezogen werden. Dies gilt insbesondere, wenn das verfügbare Energieangebot aus EE-Strom beschränkt ist.
- **Die Menge nachhaltig erzeugbarer Biomasse ist beschränkt** (siehe Abschnitt 2.5.1).

Tabelle 2 bietet eine bewertende Übersicht der zentralen Parameter der vier vollständigen Dekarbonisierungsoptionen. THG-Effizienz ist nicht enthalten, da davon ausgegangen wird, dass nur THG-freie Herstellungspfade der Energieträger gewählt werden. Da davon auszugehen ist, dass die Menge des verfügbaren erneuerbaren Stroms bis 2050 noch ein limitierender Faktor sein wird, stellt die Energieeffizienz den wichtigsten Faktor dar. Hier schneidet die direkte Stromnutzung mit Abstand am besten ab. Die Nutzung von Biomasse unterliegt durch die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion den stärksten Mengenrestriktionen und birgt dadurch auch das stärkste Konfliktpotenzial.

Bei den Kostentreibern überwiegen bei direkter Stromnutzung und Wasserstoff die Kosten der Speicher und bei PtL, PtG und Biomasse die Kosten der Verbrennungsmotoren, während Elektromotoren vergleichsweise günstig sind. Größter Nachteil der Strom-Direktnutzung und des Wasserstoffs ist die technologisch aufwendige Batterieherstellung bzw. Herstellung der Brennstoffzellen. Insbesondere bei Batterien kommt das Gewicht bzw. die geringe Energiedichte hinzu, welche diese für den Luftverkehr nicht nutzbar macht. Andererseits kann plausibel davon ausgegangen werden, dass sowohl für Batterien als auch für Brennstoffzellen die technologischen Herausforderungen bis 2050 für den Personenverkehr und den leichten Lieferverkehr vollständig gelöst sind. Mit einiger Wahrscheinlichkeit gilt dies auch bereits für 2030.

Der Aufbau der (Schnell-)Ladeinfrastruktur bzw. der Wasserstofftankstellen dürfte eine ambitionierte aber machbare Aufgabe sein, während für PtL bzw. PtG unklar ist, ob und wie in einer dekarbonisierten Welt die zukünftig erforderliche Menge an CO<sub>2</sub> für den Herstellungsprozess bereitgestellt werden kann (siehe Abschnitt 2.4.2 und 2.5.3).

Tabelle 2: Übersicht positiver und limitierender Aspekte der verschiedenen Energieträger

	Energieeffizienz	Kosten Motor	Kosten Speicher	Technologische Herausforderung	Konfliktpotenzial
<b>Strom direkt</b>	+++	++	--	Batterie(-gewicht) Ladeinfrastruktur	Gering, zu wenig Lärm <sup>19</sup>
<b>Wasserstoff</b>	+	++	--	Brennstoffzelle Tankinfrastruktur	Gering. zu wenig Lärm
<b>PtL, PtG</b>	-	-	+	Verfügbarkeit CO <sub>2</sub> Kosten Massenproduktion	Mittel, Abgase
<b>Biomasse</b>	+	-	+	Verfügbarkeit	Hoch, Nahrung

Quelle: M-Five

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen für eine vollständige Dekarbonisierung der einzelnen Verkehrsmittel diskutiert und, soweit möglich, notwendige Entwicklungen mit einem Zeitpfad hinterlegt.

#### 4.3.1 PKW und leichte Nutzfahrzeuge bis 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht

Für PKW und leichte Nutzfahrzeuge (INFz) bis 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht im Verteiler- und Regionalverkehr ist die direkte Stromnutzung möglich und zu empfehlen. Reine Batteriefahrzeuge der Oberklasse, wie der Tesla Model S, erreichen heute schon eine Reichweite von 450 km. Für die Jahre 2020 bis 2022 haben mehrere Hersteller auch für die Kompaktklasse PKW mit elektrischen Reichweiten von rund 500 km angekündigt (z.B. Nissan, Skoda, VW). Auch wenn von einigen

<sup>19</sup> Zumindest in einer Übergangsphase der Einführung von E-Mobilen wird im urbanen Raum, wo Konfliktpotenzial mit Fußgängern und Radfahrern gegeben ist, mit erhöhtem Unfallrisiko durch E-Mobile gerechnet, da die oft praktizierte Orientierung nach dem Gehör das Risiko aufweist, die leisen E-Mobile zu überhören.

Experten immer wieder Zweifel an Energiedichten, Batteriekosten, Batteriehaltbarkeiten und damit Reichweiten geäußert werden, halten die Autoren dieses Papiers diese Entwicklungen für möglich und wahrscheinlich. Dennoch muss festgehalten werden, dass der Erfolg oder Misserfolg der schnellen und flächendeckenden Diffusion von batterieelektrischen Fahrzeugen eine Kernfrage der Dekarbonisierung darstellt; diese hat, wie sich in Kapitel 5 zum Umwandlungssektor zeigt auch dort starke Auswirkungen.

**Kernfrage 5:** Setzen sich batterieelektrische Fahrzeuge im Verkehrssektor durch?

Auch sollen die Fahrzeuge schnellladefähig sein, so dass Fahrten über die Reichweite von 500 km hinaus durch das Einlegen von regelmäßigen halbstündigen Pausen möglich werden. Ggf. treten hier Engpässe bei der Verfügbarkeit von Schnellladestationen und der Anbindung derselben an die letzte Meile im Stromnetz auf. Dies gilt es durch lokale Netzsimulationen unter den Rahmenbedingungen heutiger Autobahntankstellen zu überprüfen; bestätigt sich die Schnellladefähigkeit an Autobahnen bedeutet dies:

- Wasserstoffbrennstoffzellen (H<sub>2</sub>-BZ)-Fahrzeuge werden bei PKW und leichten Nutzfahrzeugen höchstwahrscheinlich keine Rolle spielen.
- Plug-in Hybride werden nur für eine eher kurze Übergangszeit relevant sein. Zwei Argumente lassen sich gegen die längerfristige Nutzung von Plug-in Hybriden bei PKW und INFz anführen:
  - Die Technologie erfordert den Einbau von zwei Antriebssträngen mit zwei Motoren (Verbrennungs- und Elektromotor) und Energiespeichern (Tank und Batterie) sowie einer komplexen Steuerungselektronik. Das macht die Plug-in Hybride teurer und schwerer als reine Batteriefahrzeuge. Den heute geltenden Vorteil des Einbaus einer kleineren Batterie verlieren die Plug-in Hybride mittelfristig durch die deutlich sinkenden Batteriepreise.
  - Die EU Kommission hat das Ziel definiert, bis 2050 alle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren aus den Städten zu verbannen [Europäische Kommission 2011]. Grund sind Lärm und Abgase, die in den Städten die Gesundheit der Menschen gefährden. Auch Plug-in Hybride verursachen diese Umwelteffekte und sollten daher gleichfalls verbannt werden.
- Sollte ein vollständiger Verzicht auf Plug-in Hybride nicht möglich oder nicht gewünscht sein, dann ist sicherzustellen, dass **Verbrennungsmotoren entweder vollständig mit Bioethanol** (größere Verfügbarkeit

und nicht in Konkurrenz um Biodiesel mit dem Luft- und Schiffsverkehr) **oder mit Biogas** fahren können.

**Ableitungen zum Zeitpfad:** Für PKW lässt sich aus der Zielsetzung einer vollständigen Dekarbonisierung bis 2050 folgendes ableiten:

- **Kein weiterer Verkauf von PKW mit Verbrennungsmotoren und ohne Elektroantrieb nach 2030.** Bei einer zu erwartenden Lebensdauer von 20 Jahren werden 2050 dann die letzten reinen Verbrenner stillgelegt bzw. im Falle weniger ambitionierter Ziele in anderen Ländern ins Ausland exportiert.
- **Verkauf von Plug-in Hybriden nach 2030 entweder gar nicht** oder nur noch mit Gas-Motoren oder als Benziner mit einer Kraftstoffversorgung, die auf **Nutzung von 100 % Bioethanol** ausgelegt ist.

#### **4.3.2 Nutzfahrzeuge ab 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht - LKW**

Die bereits im Basisszenario der Langfristszenarien als Emissionsreduktionsoption eingesetzten Oberleitungs-LKW adressieren ein zentrales Problem ambitionierter Dekarbonisierungsszenarien: **Ein Großteil der direkten Emissionen des Güterverkehrs (ca. 65 %) entsteht durch schwere LKW zwischen 12 und 40 t Gesamtgewicht.** In diesem Bereich sind nach heutigem Wissensstand batterieelektrische Antriebe oder Brennstoffzellen technisch kaum sinnvoll einsetzbar. Es verbleiben daher nur die Möglichkeiten, CO<sub>2</sub>-freie Treibstoffe einzusetzen (biomasse- oder strombasiert), die Versorgung elektrischer Antriebe über Oberleitungen sowie eine Verlagerung auf die Schiene. Letzteres kann und soll einen Beitrag zur Emissionsvermeidung leisten, kann aber insbesondere in einer vollständigen Dekarbonisierung nicht die einzige Maßnahme im Güterverkehr bleiben. Würde der gesamte Schwerlastverkehr auf die Schiene verlagert, würde dies zu einer Vervielfachung des Güterverkehrsaufkommens der Bahn führen. Dies müsste mit einem massiven Ausbau der Schieneninfrastruktur verbunden werden, was in der Umsetzung zu starken Akzeptanzproblemen führen würde. Das Potential für Biomasse und PtL ist, wie im Abschnitt 2.5 dargelegt, ebenfalls beschränkt und hier stünde Nachfrage durch LKW auch im Wettbewerb mit Nachfrage nach flüssigen Kraftstoffen durch den Luft- und Schiffsverkehr. **Insofern liegt für den Fall der vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrs mit schweren LKW eigentlich kein Lösungsansatz vor, der den Schwerlastverkehr ohne den Einsatz von Oberleitungen emissionsfrei gestaltet.** Da aber nur Teile des Straßennetzes mit

Oberleitungen ausgestattet würden, verbleiben Strecken, die schwere LKW mit flüssigen Kraftstoffen zurücklegen müssten (z.B. PtL, Biodiesel, Bio-LNG).

### 4.3.3 Busse

Die Optionen zur Dekarbonisierung von Bussen hängen von ihrem Einsatzzweck ab. **Busse für den Nahverkehr in Städten könnten als Oberleitungsbusse ausgeführt werden.** Da dies eine Methode der direkten Stromnutzung ist, ist diese Option aus Effizienzperspektive vorzuziehen. Je nach Einsatzprofil und Größe des Busses lassen sich auch batteriebetriebene Busse nutzen. Ggf. müssen diese an Haltestellen oder Endhaltepunkten z.B. über Induktion oder den temporären Anschluss an Oberleitungen aufgeladen werden. Zusätzlich können hier auch sogenannte Super-Kondensatoren (häufig auch als Super-Caps bezeichnet) genutzt werden, die in kürzester Zeit hohe Energiemengen speichern und dann gesteuert auch langsam wieder abgeben können.

**Für Busse zur Nutzung auf der Fernstrecke verbleiben prinzipiell die gleichen Optionen wie für schwere LKW:** Versorgung über Oberleitung, PtL/PtG, Biomasse.

Dabei muss jedoch ein Unterschied zwischen Bussen und schweren LKW bzw. Sattelzugmaschinen beachtet werden: Busse haben eine wesentlich längere Nutzungsdauer als LKW. Deshalb müssen für eine vollständige Dekarbonisierung bis 2050 entweder

- die Dieselbusse frühzeitiger vom Markt verschwinden (ca. 2035),
- Optionen zum Retrofit von Bussen als Oberleitungsbus oder als Batterie-Bus geschaffen werden, oder
- es muss sichergestellt werden, dass PtL/PtG bzw. Biomasse in ausreichender Menge bereitgestellt wird, um neben dem Luft- und Schiffsverkehr sowie Teilen des LKW-Verkehrs auch die Busse zu bedienen.

### 4.3.4 Luft- und Schiffsverkehr

Beim Flug- und Seeverkehr bestehen die größten Herausforderungen für eine vollständige Dekarbonisierung. Als Erstes muss aber betont werden, dass beide Verkehrsträger noch über substanzielle Energieeffizienzpotenziale verfügen, die zunächst gehoben werden sollten.

Aus heutiger Sicht kommen für die Dekarbonisierung des Luft- und Schiffsverkehrs weder die direkte Stromnutzung noch die Nutzung von Wasserstoff (abgesehen



vom Betrieb von Nebenaggregaten in Flugzeugen) in Frage; dies liegt an der Kombination aus geringer Energiedichte beider Optionen und der hohen Energienachfrage dieser Verkehrsträger bei jedem einzelnen Flug bzw. jeder Fahrt. Damit verbleiben für diese Verkehrsträger die beiden folgenden Optionen:

- Flüssige Kraftstoffe aus Biomasse (Bio-Kerosin, Biodiesel, Bio-LNG).
- Flüssige Kraftstoffe aus Strom (PtL).

Für Schiffe ist auch unterstützend die direkte Nutzung von Windenergie denkbar, z.B. in Form von Segeln, Flettner-Rotoren oder Sky-Sails.

Zu beachten ist, dass sowohl Biomasse und PtL Mengenbeschränkungen unterliegen: Sollte der gesamte Flug- und Seeverkehr auf Biokraftstoffe umgestellt werden, würde dies bei den Verkehrsnachfragen der Langfristszenarien ca. 40 % der insgesamt verfügbaren 400 TWh Biomasse in Anspruch nehmen. Dadurch würde in anderen Verkehren und Sektoren entsprechend weniger Biomasse zu Verfügung stehen. Die Nutzung von PtL ist beschränkt durch Limitierung des Angebotes an erneuerbarem Strom und von CO<sub>2</sub> in einer dekarbonisierten Welt (siehe Abschnitt 2.5.3).

#### **4.3.5 Priorisierung der technischen Lösungen der Verkehrsträger**

Die folgende Tabelle 3 fasst die Argumentationslinien aus den vorhergehenden Abschnitten zusammen und zeigt, welche Lösungen für welche Verkehrsmittel für eine vollständige Dekarbonisierung zu priorisieren sind.

**Für PKW und leichte Nutzfahrzeuge bildet die direkte Stromnutzung mit Batterien die ideale Lösung.** Es wird davon ausgegangen, dass der Fortschritt der Batterietechnik die Hemmnisse dieser Option beseitigen wird. Aufgrund der höheren Energieeffizienz ist diese Option gegenüber der H<sub>2</sub>-BZ-Nutzung als vorteilhaft anzusehen.

**Für schwere LKW auf der Langstrecke bietet sich die Oberleitungstechnik an.** Der wichtigste Vorteil ist auch hier wieder die gegenüber anderen Optionen bessere Energieeffizienz. Diese LKW dürften hybridisiert sein, wobei hier sowohl Batterie als auch Brennstoffzelle oder ein mit PtL oder Biokraftstoff betriebener Motor für die letzte Meile in Frage kommen. Bei ausreichendem Angebot an PtL / Biomasse könnten auch weiter mit Dieselmotor betriebene LKW genutzt werden, sowie für den Regional- und Verteilerverkehr auch LKW mit Brennstoffzellen.

Für Busse stellt sich die Priorisierung ähnlich dar, wobei Oberleitungsbusse auch im städtischen Nahverkehr sehr geeignet sind, während Busse mit Brennstoffzellen im Regionalverkehr besser einsetzbar wären.

**Für die Bahn bietet die Elektrifizierung mit Oberleitung die etablierte und ideale Lösung.** Für Rangierfahrten und untergeordnete Nebenbahnen dürfte ein geringer Teil an mit PtL oder Biodiesel betriebenen Lokomotiven verbleiben.

**Für Flugzeuge und Schiffsverkehr verbleiben aufgrund der Energiedichte und des Energieverbrauchs der Verkehrsmittel nur die flüssigen Kraftstoffe als Optionen.** Da zunächst nur Biokraftstoffe zur Verfügung stehen werden, sind diese hier als erste Priorität bewertet. Aus Sicht der Fahrzeugtechnologie sind Biokraftstoffe und PtL als gleichwertig anzusehen, so dass mit der steigenden Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom PtL an Bedeutung gewinnen könnte. Hier darf allerdings nicht die mögliche Restriktion der begrenzten Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub> in einer dekarbonisierten Welt außer Acht gelassen werden. Im Schiffsverkehr bietet sich die Nutzung der Windenergie als Spezial-Lösung ebenfalls, ggf. nicht als alleiniger Antrieb, aber zumindest für Hybridlösungen im Schiffsantrieb.

Tabelle 3: Priorisierung der Nutzung der technischen Optionen der Verkehrsträger

	<b>Erste Priorität</b>	<b>Zweite Priorität</b>	<b>Dritte Priorität</b>	<b>Spezial-lösung</b>
PKW, INFz	Strom + Batterie			
LKW	Strom + Oberleitung	PtL / Biomasse	H2-BZ	
Bus	Strom + Oberleitung	H2+BZ	PtL	
Bahn	Strom + Oberleitung	PtL / Biomasse		
Flugzeug	Biomasse	PtL	H2-BZ für Nebenaggregate	
Schiff	Biomasse	PtL		Wind

Quelle: M-Five

#### 4.3.6 Die Rolle des Modal-shift und die Rolle der Bahn

Modal-shift, d.h. eine geänderte Wahl der Verkehrsträger, wird seit Jahren als eine zentrale Maßnahme zur Erreichung eines nachhaltigen Verkehrs gesehen. Die

Schlussfolgerung im Projekt „Environmentally Sustainable Transport“ der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) lautete: **Nachhaltiger Verkehr bis 2030 wird zu 40 % durch technische Entwicklung erreicht werden und zu 60 % durch Verhaltensänderung.** Ein großer Teil der Verhaltensänderung soll als Modal-shift erfolgen [Nitsch et al. 2004a]. Ähnlich motiviert ist die Zielsetzung des europäischen Weißbuchs für Verkehr von 2011 bis 2050 über 50 % der Gütertransportleistung auf Distanzen über 300 km nicht auf der Straße, sondern insbesondere auf der Bahn transportieren zu wollen [Europäische Kommission 2011].

Effiziente Elektromobilität ist seit Jahrzehnten ein Vorteil der Bahn, die den weitaus größten Teil ihrer Transportleistung auf elektrifizierten Strecken erbringt. Daher resultieren die Setzungen von Politikzielen zur Verlagerung auf die Bahn, um klimaschonenden und nachhaltigen Verkehr zu realisieren. So gehen beispielsweise verschiedene Klimaschutzszenarien schon bei einer 80%igen Emissionsreduktion von einer Verdopplung des Schienengüterverkehrs (z.B. [Repenning et al. 2015]) bis zu einem Anstieg auf das 3,5-fache aus (dies ist z.B. im Basisszenario der Langfristszenarien der Fall). Eine Verdopplung der Verkehrsleistung bis 2030 unter der Voraussetzung eines moderaten Ausbaus der Schieneninfrastruktur erscheint möglich durch eine Konzentration auf wichtige Güterverkehrskorridore, wie eine Studie des UBA belegt [Holzhey 2014]. Weitere Steigerungen erfordern sicher ausgeprägte Anstrengungen beim Ausbau der Bahninfrastrukturen. Außerdem muss die Bahn kurzfristig und engagiert das Thema Lärmsanierung des Güterverkehrs durch passiven und aktiven Schallschutz angehen, da ansonsten die Akzeptanz des Neu- und Ausbaus von Trassen für den Schienengüterverkehr nicht gegeben sein wird. Neben dem Ausbau von Trassen wird ebenfalls ein deutlicher Ausbau von Umschlaganlagen erforderlich, da die meisten Bahntransporte im Vor- und Nachlauf die Nutzung des LKW erfordern.

#### **4.3.7      Sektorkopplung des Verkehrs in einer vollständigen Dekarbonisierung**

Generell wird in einem 95%-Szenario der Sektorkopplung eine zentrale Bedeutung zukommen; zum einen, um Fluktuationen der EE-Erzeugung auszugleichen; zum anderen, da wie oben dargestellt stark auf Strom oder strombasierte Kraftstoffe zurückgegriffen werden muss. **Es existieren drei Wege, die Sektorkopplung inklusive Ausgleich der Schwankungen der EE-Erzeugung zu gestalten,** die sich in den Zeitskalen, in welchen solche Schwankungen ausgeglichen werden, unterscheiden. Die drei Optionen sind:

- **Direkte Stromnutzung:** Der Ausgleich von Schwankungen erfordert den Aufbau von Smart Grids bei denen ein „Schwarm“ von batteriebetriebenen PKW oder Nfz über das Smart Grid gesteuert be- und ggf. auch wieder entladen werden kann. Dieser Ausgleich funktioniert aber nur für kurzfristige Schwankungen im Bereich von Minuten oder sehr wenigen Stunden. Zum Ausgleich von längerfristigen Schwankungen könnte der Verkehrssektor indirekt einen Beitrag leisten, wenn eine größere Anzahl ausgedienter Fahrzeugbatterien zu einem großen Batteriespeicher zusammengeschaltet wird (Second Life Nutzung von Batterien) und so größere Energiemengen auch länger speicherbar werden. Die direkte Stromnutzung ist die schwächste Option zum Ausgleich von Schwankungen in der EE-Erzeugung, aber eben auch die Option mit der höchsten Energieeffizienz.
- **Wasserstoff-Nutzung:** Wasserstoff lässt sich durch Elektrolyse aus Strom gewinnen. Wasserstoff kann direkt im Verkehr in Fahrzeugen mit Brennstoffzelle genutzt oder gespeichert werden, entweder im Erdgasnetz (solange dieses noch existiert und welches ca. 6 % Beimischung von Wasserstoff zulässt) oder in speziellen Speichern und dann bei Bedarf der Nutzung zugeführt werden. Die Nutzung kann im Prinzip sowohl im Verkehr als auch in der Strom- oder der Wärmeerzeugung liegen. Vorteil dieser Art der Sektorkopplung ist der flexible Einsatz des Wasserstoffs in den verschiedenen Sektoren. Andererseits hat die Nutzung von Wasserstoff für kein Verkehrsmittel die oberste Priorität (siehe Tabelle 3).
- **Strombasierte synthetische Kraftstoffe (PtL, PtG):** Die Erzeugung dieser Kraftstoffe erfordert als Inputs Strom und bilanzneutrales CO<sub>2</sub> und läuft über einen Zwischenschritt, in dem ebenfalls Wasserstoff (H<sub>2</sub>) erzeugt wird. Insbesondere PtL-Kraftstoffe besitzen sowohl aus der Sicht des Ausgleichs von Schwankungen als auch der Nutzung im Verkehr Vorteile. PtL-Kraftstoffe können als flüssige Energieträger in großen Tanks einfach gelagert werden. Sie liefern eine hohe Energiedichte, so dass sie auch im Luftverkehr einsetzbar sind. Ihr Nachteil liegt in der deutlich niedrigeren Energieeffizienz im Vergleich zu den anderen beiden Optionen direkte Stromnutzung und Wasserstoff. Aus heutiger Sicht bleibt unklar, ob eine ausreichend große Menge bilanzneutrales CO<sub>2</sub> zur Erzeugung von PtL- bzw. PtG-Kraftstoffen in einer dekarbonisierten Welt zur Verfügung stehen wird.

Es zeigt sich, dass keine Option der Sektorkopplung in allen Faktoren den anderen überlegen ist. **Das legt die Entwicklung einer Kombination der verschiedenen Optionen nahe.** Zum Ausgleich kurzfristiger Schwankungen und als energieeffizienteste Nutzung von EE-Strom ist die direkte Stromnutzung bei PKW, Nfz und

der Bahn zu entwickeln. Zum Ausgleich von langfristigen Schwankungen und als Energieträger für den Luftverkehr, ggf. auch im Schiffsverkehr, ist die Nutzung von PtL die beste Lösung. PtG oder Wasserstoff könnten zum Einsatz kommen in hybriden PKW, NFz im Regionalverkehr oder in Bussen. Bei Nutzung von PtL bzw. PtG in Verbrennungsmotoren ist sicherzustellen, dass in Zukunft keine schädlichen Abgase mehr emittiert werden.

#### **4.4 Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95%-Welt**

Bei Überlegungen zu den heute notwendigen Schritten ist zu beachten, dass auch seitens der EU bereits bestimmte Maßnahmen vorgeschrieben sind. Die **Europäische Richtlinie zum Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe** (EU Richtlinie 2014/94) schreibt die Pfade zur Umsetzung und zum Aufbau der Lade- und Betankungsinfrastruktur im Verkehr für die Zielhorizonte 2020 und 2025 vor. Zu diesen Zielhorizonten soll die jeweilige Infrastruktur soweit aufgebaut sein, dass sie kein Hemmnis mehr bildet für die Nutzung eines spezifischen Energieträgers im Verkehr. Tabelle 4 listet die Zeithorizonte für den Infrastrukturaufbau der verschiedenen alternativen Energieträger im Verkehr auf. Bis Ende 2016 müssen die EU Mitgliedsstaaten ihre konkreten Aufbauplanungen definieren und an die EU melden. Die Implementierung der Richtlinie sollte dazu führen, dass das bekannte „Henne-Ei-Problem“ zwischen Infrastruktur und Fahrzeugen mit alternativen Antrieben spätestens zwischen 2020 und 2025 deutlich entschärft wird.

Tabelle 4: Zeitpfad des Infrastrukturaufbaus für alternative Energieträger im Verkehr

Energie-träger	Verkehrsträger	Versorgungs-art	Ort	Fertig-stellung
Strom	Straßenverkehr	Öffentliche La-destationen	Städte und Ver-dichtungs-räume	Ende 2020
CNG	Straßenverkehr	Gas-Tankstel-len	Städte und Ver-dichtungs-räume	Ende 2020
CNG	Straßenverkehr	Gas-Tankstel-len	Korridore der trans-europäi-schen Verkehrs-netze	Ende 2025
Strom	Schiffsverkehr	leistungsfä-hige An-schlüsse	Versorgung im Ha-fen (TEN-V <sup>20</sup> et al.)	Ende 2025
H2*	Straßenverkehr	H2-Tankstel-len	Flächendeckend	Ende 2025
LNG	Seeschiffahrt	Tankstelle	Seehäfen des TEN-V Kernnetzes	Ende 2025
LNG	Binnenschiff-fahrt	Tankstelle	Binnenhäfen des TEN-V Kernnetzes	Ende 2030
LNG	LKW	Tankstelle	Korridore der trans-europäi-schen Verkehrs-netze	Ende 2025

\* wenn sich ein Mitgliedsstaat für den Einsatz von H2 entscheidet, Deutschland hat sich positiv entschieden

Quelle: M-Five nach EU Richtlinie 2014/94, [http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/cpt/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/cpt/index_en.htm)

Die zweite wichtige EU-Regulierung betrifft die **TEN-V Regulierungen** (EU Verordnung 1315/2013 zum TEN-V Netz und 1316/2013 zur „Connecting Europe Facility“-Finanzierung). Hierdurch wird sowohl ein kohärentes europäisches Verkehrsnetz mit qualitativ hochwertiger Bahninfrastruktur definiert als auch dessen Ausstattung mit Versorgungsanlagen für alternative Antriebe z.B. entlang des Straßennetzes oder in Häfen.

Zur **Priorisierung der technologischen Pfade für alternative Antriebe** ist in Abschnitt 4.3 ausführlich Stellung bezogen worden. Festzuhalten bleibt: direkte

<sup>20</sup> Transeuropäische Verkehrsnetze (TEN-V)

Stromnutzung ist ideal und sollte überall dort zum Zuge kommen, wo dies technisch im Verkehrssystem möglich ist. Biogene Kraftstoffe oder in begrenztem Umfang synthetische strombasierte flüssige Kraftstoffe sind für den Luftverkehr die beste Lösung zur Dekarbonisierung. Letztere verbrauchen aber vermutlich einen Großteil, wenn nicht das gesamte zu Verfügung stehende bilanzneutrale CO<sub>2</sub>. Wasserstoff ist Strom unter Energieeffizienzgesichtspunkten und PtL unter Verkehrsgesichtspunkten unterlegen.

Folgende Empfehlungen hinsichtlich des Aufbaus von Systemtechnologien können noch abgegeben werden:

- Dekarbonisierung von schweren LKW auf der Langstrecke sollte durch Aufbau eines Oberleitungs-Hybrid Systems für LKW (OH-LKW) entlang der Hauptstrecken erfolgen. Diese Technik existiert heute nur als kurze Versuchsstrecke. Sie sollte durch Förderung in den realen Testbetrieb gebracht werden sowie verschiedene Konzepte (z.B. Spannung 750, 1500, 3000 V, Hybridisierung mit Batterie oder Gas, etc.) implementiert und erprobt werden. Aufgrund der kürzeren Lebensdauer von LKW würde es aber genügen, wenn die letzten fossil betriebenen schweren LKW in 2040 verkauft würden.
- Dekarbonisierung von Bussen im Stadtverkehr kann ebenfalls durch Oberleitungsbusse erfolgen. Bei Bussen ist allerdings die deutlich längere Nutzungs- und Lebensdauer zu beachten, die 20 bis 25 Jahre betragen kann. Das bedeutet: die letzten fossil betriebenen Busse sollten in Deutschland 2025 bzw. spätestens 2030 gekauft werden. Alternativen wie Oberleitungsbusse müssen daher zeitnah angegangen werden.

Die Lebensdauer der Verkehrsmittel bietet einen wichtigen Anhaltspunkt für Handlungsbedarf bei den technologischen Pfaden. **Je länger die Fahrzeuge genutzt werden, desto früher muss eine Umstellung auf Fahrzeuge mit alternativen Technologien erfolgen.** Für besonders langlebige Fahrzeuge könnte die Option eines Retrofittings mit alternativen Antrieben eine Rolle spielen. Die kürzeste Lebensdauer im Verkehr weisen schwere LKW auf, die die Langstrecke bedienen und nach 4-5 Jahren wieder abgegeben werden, allerdings häufig für eine weitere Nutzung im Ausland. Bei leichten Nutzfahrzeugen und PKW liegen die Lebensdauern zwischen 15 und 25 Jahren. Flugzeuge, Schiffe und Lokomotiven werden 35 Jahre und länger genutzt. Für letztere heißt dies: bereits heute werden Fahrzeuge verkauft, die 2050 noch in Betrieb sein werden.

**Nimmt man für PKW eine Lebensdauer von 20 Jahren an und legt das Ziel zugrunde, in 2050 keine fossil betriebenen PKW mehr zu nutzen, muss der Verkauf von reinen Diesel- und Benzin-PKW spätestens ab dem Jahre 2030**

**eingestellt werden. Ähnliches gilt für Plug-in Hybride PKW.** Unterstellt man eine etwas kürzere Lebensdauer für PKW z.B. 15 Jahre könnte der Zeitpunkt für das Ende des Verkaufs von PKW mit Verbrennungsmotoren **bis 2035** hinausgeschoben werden wie im Projekt GHG-TransPoRD. Auch die Nutzung von Biokraftstoffen oder synthetischen Kraftstoffen stellt hier vermutlich keine Alternative dar: Die verfügbaren Mengen sind begrenzt und Verkehrsmitteln ohne Alternativen vorbehalten. Von diesem Ziel aus gedacht, ist auch die Diskussion welcher CO<sub>2</sub>-Zielwert für 2030 für den Durchschnitt der neuen PKW gelten soll obsolet: Der Zielwert müsste bei null sein.

Für LKW und Busse sollten zwei Vorschriften für neue Fahrzeuge eingeführt werden:

- entweder sie sind in der Lage, problemlos zukünftige **alternative Kraftstoffe** zu tanken (d.h. 100 % Biodiesel, Biogas, Bio-LNG oder vergleichbare synthetische Kraftstoffe), oder
- die Fahrzeuge sind vorgesehen für ein **Retrofitting**, d.h. einen Austausch des Motors und der Nebenaggregate und einen Ersatz durch einen alternativen Antrieb.

**Außerdem sind weitere technologische Pfade durch Förderung zu prüfen und zu entwickeln.** Dazu gehört die großtechnische Erzeugung von Biokraftstoffen, insbesondere Biokerosin, aus Algen und die großtechnische Erzeugung von PtG und PtL, sowohl unter den Rahmenbedingungen der begrenzten Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub> als auch unter der Notwendigkeit, das benötigte CO<sub>2</sub> aus der Luft gewinnen zu müssen.

Hinsichtlich der Nutzung von Wasserstoff und Brennstoffzellen sollte geprüft werden, unter welchen Bedingungen der Einsatz in LKW und Bussen sinnvoll ist. Hierzu sind Tests unter realen Bedingungen zu empfehlen.

Kontinuierliche **Forschungsförderung** ist zu empfehlen für die Weiterentwicklung der potenziell zentralen Technologien einer Dekarbonisierung:

- Batterien (z.B. Lithium-Ionen)
- Brennstoffzellen

Dazu gehört auch Materialforschung. Die Förderung sollte zwei Ziele verfolgen: Kostenreduktion und das Schaffen von Optionen für das Ziel, die Produktion dieser Technologien in Deutschland zu realisieren.



Auch bei einer ambitionierten **Verlagerung von Verkehr auf die Bahn** stellt sich die Frage nach der grundsätzlichen Machbarkeit. Während bei der Entwicklung von alternativen Technologien, wie Brennstoffzellen-LKW oder PtL, die großtechnische Machbarkeit und die Verfügbarkeit von ausreichenden Mengen erneuerbarem Strom hemmende bzw. limitierende Faktoren darstellen, ist es bei der Verlagerung auf die Bahn die Fähigkeit, die notwendigen Investitionen in Infrastrukturen planerisch und investiv zu bewältigen. Zusätzlich muss ausreichend Akzeptanz in der Bevölkerung für den umfangreichen Ausbau der Bahn vorhanden sein. Nimmt man zum Maßstab, dass heute Schienenwege gebaut werden, die Anfang der 1990er Jahre im Bundesverkehrswegeplan standen, und dass der im März 2016 veröffentlichte neue Bundesverkehrswegeplan die Investitionsvorhaben bis 2030 festlegt, **muss heute bereits mit den Planungen begonnen werden**, um die Bahnkapazität nach 2030 auf eine weitere Steigerung von ca. 80 % der Nachfrage bis 2050 vorzubereiten.

### **Beispielmaßnahmen**

Die Umsetzung der skizzierten technologischen Pfade erfordert bereits kurz- und mittelfristig Maßnahmen. Dabei ist zu beachten, dass einige dieser Maßnahmen direkt oder indirekt **Suffizienzmaßnahmen** darstellen, bei deren Implementierung die Sicherstellung der notwendigen Akzeptanz herausfordernd ist. Im Folgenden sollen beispielhaft einige Maßnahmen in Richtung einer vollständigen Dekarbonisierung skizziert werden. Diese sollen nicht als hinreichendes Maßnahmenpaket verstanden werden, sondern dienen der Illustration der Maßnahmenarten und dem erforderlichen Ambitionsniveau.

- **Abschmelzen und Abschaffung der Entfernungspauschale**, sowie Ausgleich durch Einführung einer Umzugspauschale, die Zuschüsse zu Umzügen gewährt bei denen die Distanzen zwischen Wohnen und Arbeit verringert werden.
- Schaffung der Möglichkeiten zur **gleichwertigen Besteuerung des Luftverkehrs** im Vergleich mit anderen Verkehrsträgern. Dies kann z.B. geschehen durch die Einführung und Erhebung einer Kerosinsteuer sowie von Mehrwertsteuer. Hilfsweise könnte auch die existierende Ticketabgabe ausgedehnt werden.
- Der niedrige Ölpreis könnte **Erhöhungen der Mineralölsteuer** und eine **Ausrichtung der Steuersätze für fossile Kraftstoffe an den CO<sub>2</sub>-Emissionen** zweckdienlich oder sogar erforderlich machen.

## 5 Umwandlungssektor

Die Dekarbonisierung des Umwandlungssektors ist durch die für ambitionierte Dekarbonisierungsziele erforderliche Sektorkopplung ein zentraler Aspekt einer 95%igen Reduktion. Durch die starke Dekarbonisierung reduziert sich der Umwandlungssektor im Wesentlichen auf die Bereitstellung von Strom- und Fernwärme, da die Bereitstellung fossiler Brennstoffe durch Kokereien und Raffinerien sehr stark abnehmen wird.

### 5.1 Status quo

Im Jahr 2016 betrug der Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch 31,7 %. In Abbildung 7 ist der Beitrag der einzelnen Energieträger zur Bruttostromerzeugung in TWh dargestellt. Braunkohle und Steinkohle sind neben den Erneuerbaren Energien die wichtigsten Energieträger und trugen in 2016 mit 262 TWh zur Bruttostromerzeugung bei. Der Beitrag der Kernenergie lag bei 85 TWh. Erdgas trug mit ca. 81 TWh zur Bruttostromerzeugung bei.

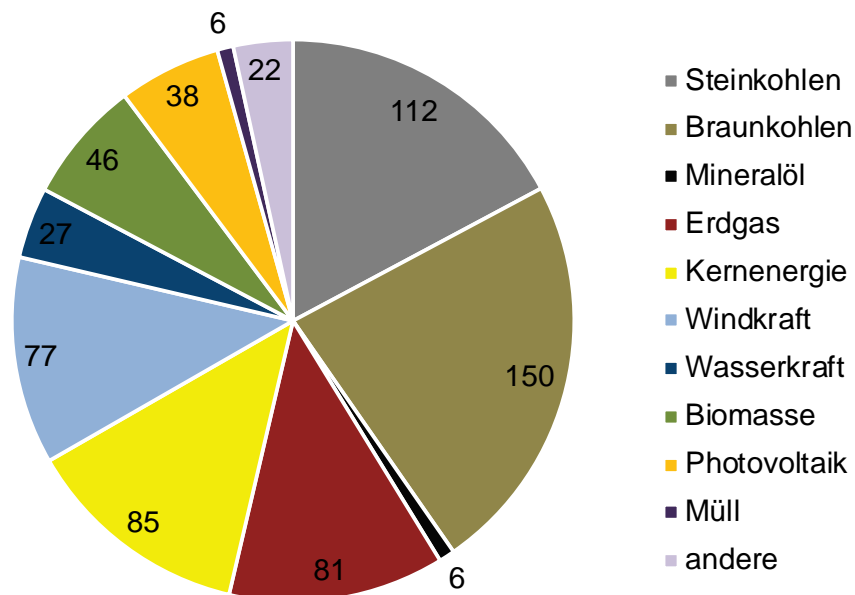


Abbildung 7: Bruttostromerzeugung 2016 in TWh. Eigene Darstellung nach [BMWi 2017]

Die Zusammensetzung für das Jahr 2016 ist das Ergebnis der Trends der letzten Jahre: Der Ausbau der Erneuerbaren Energien schreitet zügig voran und der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung ist inzwischen erheblich. Der weiterhin hohe Anteil der Kohle an der Stromerzeugung ist jedoch eine zentrale Herausforderung für das Erreichen der Klimaschutzziele in kurzer und langfristiger Perspektive.

## 5.2 Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

Im Folgenden wird auf Modellergebnisse des Basisszenarios des Projekts „Langfristszenarien“ zurückgegriffen, die mit dem Modell *Enertile*<sup>21</sup> generiert wurden. Abbildung 9 zeigt die zentralen Unterschiede der derzeitigen Stromerzeugung und den Modellergebnissen für das Jahr 2050. Dabei ist zu beachten, dass das Basisszenario weder eine Prognose noch eine konkrete Empfehlung darstellt. Ziel des Szenarios ist es, zu untersuchen, wie Deutschland seine Ziele zu den geringsten Gesamtsystemkosten erreichen kann. Der optimierende Charakter des Szenarios führt dabei in einigen Bereichen zu pointierten Entscheidungen bei der Technologieauswahl.

**Der zentrale Bestandteil der Dekarbonisierung des Umwandlungssektors ist das Aufwachsen der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien;** die Erzeugung aus EE erhöht sich von 161 TWh im Jahr 2014 auf 443 TWh im Jahr 2050. **Die wichtigste EE-Technologie und zentraler Pfeiler des Stromsystems ist im Jahr 2050 Windenergie an Land.** Wind offshore spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, überschreitet in dem Szenario aber nicht die im Szenario ab dem Jahr 2025 auf Basis der energiepolitischen Ziele vorgegebene Mindestleistung von 15 Gigawatt (GW). Für den Ausbau der Photovoltaik (PV) ist festgelegt, dass Aufdach-PV-Anlagen im Basisszenario in Anerkennung existierender politischer Entscheidungen unabhängig von ihrer ökonomischen Vorteilhaftigkeit ein Bestandteil der Stromerzeugung bleiben sollen<sup>22</sup>. Drei Viertel der derzeit anvisierten PV-Leistung von 52 GW wird als Aufdächanlagen ausgeführt, das verbleibende Viertel als Freiflächenanlagen. Im Szenario erhöht sich die Leistung bis 2050 auf insgesamt 66 GW, wobei die zusätzlichen Anlagen aus Kostengründen als Freiflächenanlagen

---

<sup>21</sup> Informationen zum Modell unter: <http://enertile.eu/>

<sup>22</sup> Das eingesetzte optimierende Stromsystemmodell *Enertile* würde ohne diese Vorgabe durch die niedrigeren Kosten Freiflächen-PV-Anlagen bevorzugen.

ausgeführt sind. Biomasse und Biogas verschwinden fast vollständig aus der ungekoppelten Stromerzeugung und werden nur in KWK-Anlagen eingesetzt bzw. in Kombinationsbefeuerungsanlagen in der Industrie oder in Nah- und Fernwärmenetzen.

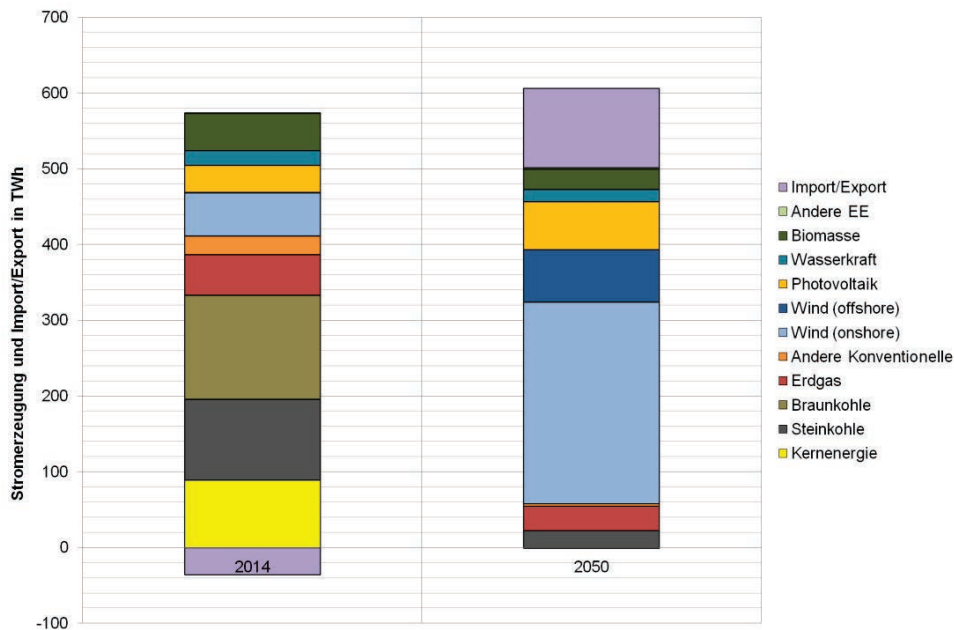


Abbildung 8: Stromerzeugung und Import/Export in TWh im Basisszenario der Langfristszenarien. Daten 2014 nach [BMWi 2017]

Die in Abbildung 9 erkennbare fossile Stromerzeugung findet fast ausschließlich in KWK-Anlagen statt. Diese werden sowohl in der Industrie als auch in Nah- und Fernwärmenetzen eingesetzt. Darüber hinaus erfolgt eine geringe Erzeugung (unter 2 TWh) aus Gasturbinenkraftwerken zur Spitzenlastdeckung, die aber mit 11 GW installierter Leistung eine nicht unbedeutende Rolle bei der Versorgungssicherheit spielen.

**Die wichtigste Quelle von „Flexibilität“ ist in dem Szenario aber das Stromnetz selbst.** Das Übertragungsnetz wird sowohl in Deutschland als auch in ganz Europa über die heute bereits beschlossenen Ausbaupläne weiter verstärkt. **Neue Stromspeicher werden nicht gebaut.** Im Basisszenario wird in ganz Europa von einem hohen Ambitionsniveau der Klimaschutzbemühung ausgegangen. Auch in Europa werden Erneuerbare Energien substantiell ausgebaut. Treiber ist hierfür der bis auf 100 EUR/t steigende CO<sub>2</sub>-Preis, der (ungekoppelte) konventionelle Stromerzeugung in den meisten Fällen unwirtschaftlich macht. Die Entwicklungen in den europäischen Nachbarländern sind auch der Treiber für die Umkehr der deutschen Austauschbilanz: Aus Kosteneffizienzgründen importiert Deutschland

im Jahr 2050 105 TWh aus dem europäischen Ausland, da dieses in der Summe über günstigere Potentiale verfügt.

**Es wird außerdem ersichtlich, dass die Stromnachfrage insgesamt steigt;** die zunehmende Sektorkopplung und Elektrifizierung überkompensieren langfristig die Effizienzmaßnahmen. Der stärkste Nachfragezuwachs geschieht im Bereich der Elektromobilität: PKW und leichte Nutzfahrzeuge erreichen im Basisszenario eine Stromnachfrage von 68 TWh, zusätzlich werden 19 TWh von Oberleitungs-LKW genutzt.

**In diesem Szenario wird Strom auch verstärkt im Wärmesektor eingesetzt:** Wärmepumpen nutzen 36 TWh Strom, wobei der Großteil der Nachfrage dabei in Wohngebäuden entsteht. Des Weiteren werden 11 TWh als Power-to-heat in Nah- und Fernwärmenetzen sowie 21 TWh zur Einsparung von fossilem Brennstoff in der Industriewärme genutzt; hierbei werden ebenfalls kombinierte Anlagenkonzepte genutzt, die sowohl über eine KWK-Anlage als auch über elektrische Heißwasserkessel verfügen. Darüber hinaus werden einige Prozesse der Industrie, die bisher mit fossilen Energieträgern betrieben werden, auf Strom umgestellt.

Im Basisszenario der Langfristszenarien ist der Umwandlungssektor in 2050 also noch nicht vollständig dekarbonisiert; fossile Energie wird in dem Szenario teilweise noch genutzt und verursacht in 2050 noch ca. 45 Mt CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>23</sup>. Davon entfallen 28 Mt auf die Stromerzeugung inkl. KWK und ca. 17 Mt auf Nah- und Fernwärmenetze,

Die Emissionen entstehen dabei in den Bereichen, in denen eine weitere Reduktion entweder kostspielig und/oder technisch schwierig ist. **Dies betrifft zum einen die Bereitstellung von Flexibilität im Bereich Strom, zum anderen die Versorgung der Nah- und Fernwärmenetze.**

---

<sup>23</sup> Des Weiteren entstehen im Umwandlungssektor des Basisszenarios noch Emissionen in Raffinerien, Kokereien etc. Diese sind für die Überlegungen zu vollständigen Dekarbonisierung irrelevant. Sie sind nur der ökologische Rucksack der geringfügigen Nutzung von fossilen Energieträgern, die in einem vollständig dekarbonisierten Energiesystem ohnehin nicht mehr zum Einsatz kommen.

## **5.3 Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands**

Für den verbleibenden Umwandlungssektor sind aus Gesamtsystemsicht drei Fragen von besonderer Relevanz:

1. Wie hoch ist das innerdeutsche EE-Erzeugungspotential?
2. Wie kann der Strom aus Erneuerbaren Energien integriert werden?
3. Welche Rolle können Stromspeicher spielen und wie kann die Fernwärme dekarbonisiert werden?

### **5.3.1 Wie viel Strom aus Erneuerbaren Energien kann Deutschland erzeugen?**

Die Transformation des Stromsektors ist das am besten erforschte und am stärksten diskutierte Element der Energiewende. Eine große Anzahl an Studien hat teilweise sehr unterschiedliche Pfade erarbeitet, wie die Emissionen der Stromerzeugung reduziert werden können, sowohl für Deutschland als auch für Europa und den Rest der Welt. Allerdings konzentrieren sich die Arbeiten bisher stark auf Pfade, die eher mit einer 80%igen Reduktion kompatibel sind. In den meisten Studien verbleibt ein nennenswerter Anteil an fossiler Stromerzeugung, zumeist Gaskraftwerke mit relativ niedrigen Einsatzstunden zur Flexibilitätsbereitstellung.

Für eine vollständige Dekarbonisierung ist jedoch der Einsatz von fossilen Kraftstoffen ohne CCS ausgeschlossen und ein noch stärkerer EE-Ausbau erforderlich. Eine erste Frage lautet daher: Welches EE-Erzeugungspotential besitzt Deutschland?

Die Antwort hängt von verschiedenen Faktoren ab. Das technische Potential, welches Akzeptanzfragen bewusst nicht berücksichtigt, wurde in verschiedenen Studien untersucht, unter anderem in der bereits zitierten Studie „Klimaneutrales Deutschland“. Das dabei ermittelte Potential beträgt 248 TWh/a für PV-Aufdachanlagen sowie 2.900 TWh/a für Wind an Land, wofür allerdings 13,8 % der Fläche Deutschlands in Anspruch genommen würde.<sup>24</sup> Auch andere Studien zum technischen Potential kommen auf Erzeugungspotentiale, die die Stromnachfrage Deutschlands (auch bei einem extremen Anstieg der Nachfrage) deutlich übertreffen. Das technische Potential stellt damit national betrachtet keine Obergrenze dar, während es lokal an besonders guten Standorten natürlich ein begrenzender Faktor ist.

---

<sup>24</sup> Zur Methodik der Berechnung der Flächennutzung siehe [UBA 2013].

Deutlich schwieriger abzuschätzen ist, welcher Ausbau Erneuerbarer Energien mit Akzeptanz in der Bevölkerung in Einklang zu bringen ist. Diese stellt vermutlich für einen bestimmten geografischen Raum, sei es eine Gemeinde, ein Bundesland oder das gesamte Staatsgebiet einen limitierenden Faktor dar, bevor das technische Potential ausgeschöpft ist. Die Akzeptanz des EE-Ausbaus wird durch eine Reihe von Faktoren auf ganz unterschiedlichen Ebenen bestimmt. Dabei spielen sowohl globale Faktoren, z.B. inwieweit die Minimierung der Treibhausgasemissionen als Menschheitsaufgabe wahrgenommen wird, als auch lokale Faktoren, z.B. die Art und Weise, wie einzelne Projekte lokal kommuniziert werden, eine zentrale Rolle.

In den Langfristszenarien wurde das verfügbare EE-Potential ermittelt, indem ein moderat ambitioniertes Niveau der Flächennutzung abgeschätzt wurde. Eine Übersicht dieser Potentiale findet sich in der folgenden Abbildung.

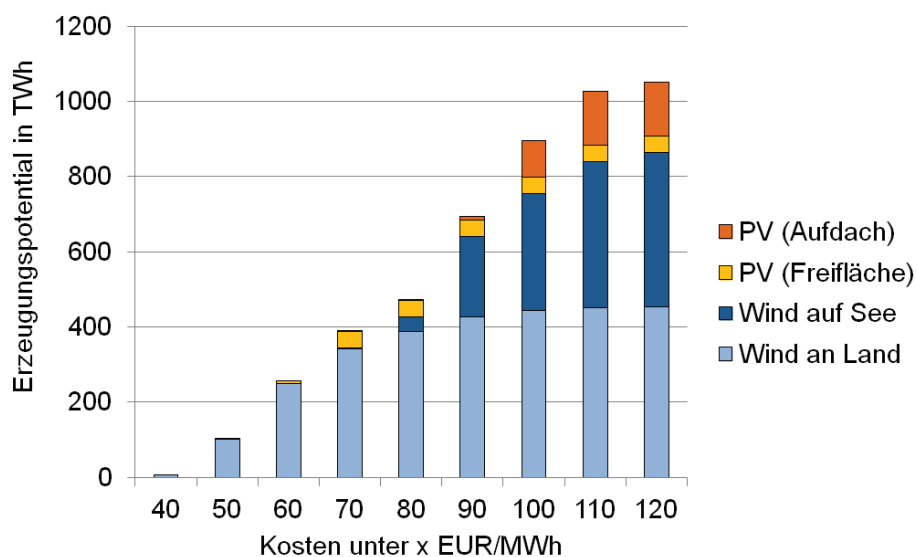


Abbildung 9: Innerdeutsches Potential zur Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie in den Langfristszenarien

Die Höhe der Balken dient als Indikator für die Größe des Potentials der unterschiedlichen Technologien. Dabei ist zu beachten, dass **durch die Ausnutzung von Standorten mit schlechteren meteorologischen Bedingungen die Erzeugungsmenge bei steigenden Kosten erhöht werden kann**; auch in 2050 kann nur an den besten Standorten Strom unter 50 EUR/MWh erzeugt werden. Die An-

lagen, die (im Vergleich zum oben eingeführten Basisszenario der Langfristszenarien) für eine vollständige Dekarbonisierung zusätzlich gebaut werden müssten, weisen tendenziell höhere Kosten auf. Dies muss beachtet werden, wenn man die Kosten von bestimmten Optionen, wie z.B. Wasserstoff oder PtG/PtL berechnen will.

**Eine höhere Erzeugungsmenge kann jedoch auch durch eine höhere Flächenkonzentration an guten Standorten** erreicht werden. In diesem Zusammenhang ist auch die nationale und internationale Akzeptanz einer verstärkten Nutzung der durchaus erheblichen Potentiale für günstige Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien im Ausland von Bedeutung.

Derzeit in Deutschland nur sehr eingeschränkt genutzte Stromerzeugungstechnologien der Erneuerbaren Energien wie die **geothermische Stromerzeugung** werden bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da kostengünstige Potentiale aus heutiger Sicht sehr begrenzt sind. Sollten hier in der Zukunft erhebliche Kostensenkungen eintreten, würde das verfügbare Potential Erneuerbarer Energien in Deutschland erhöht. Aus heutiger Sicht kann jedoch auch für diesen Fall von einer begrenzten Anhebung der verfügbaren Erzeugungspotentiale ausgegangen werden. Durch die hohe Verfügbarkeit könnte z.B. Geothermie aber zur sicher bereitgestellten Leistung beitragen.

Die **Wasserkraft** wird in der Grafik nicht explizit dargestellt, da ihre Stromerzeugung in Deutschland ebenfalls mit max. 22 TWh als weitgehend erschlossen gilt, und deshalb für den zukünftigen Stromerzeugungsmix keine nennenswerten neuen Beiträge liefern kann. **Biomasse** wird im Falle der vollständigen Dekarbonisierung in der Stromerzeugung vermutlich keine große Rolle spielen können, da diese im Verkehrssektor, der Industrie und in der Gebäudewärme benötigt wird bzw. schwieriger zu substituieren ist als im Stromsektor.

**In der Summe kann aber gefolgert werden, dass Deutschland bei entsprechender Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft über ausreichend Potential verfügt, um über 1.000 TWh Strom aus Erneuerbaren Energien zu erzeugen.** Diese Menge wird vermutlich nur dann einen Engpass darstellen, wenn massiv Pfade zur Versorgung der Nachfragesektoren gewählt werden, die mit hohen Verlusten einhergehen, wie Wasserstoff oder strombasierte Kohlenwasserstoffe.



### 5.3.2 Wie kann Strom aus Erneuerbaren Energien integriert werden?

Die Frage, ob ein EE-Anteil von 100 % technisch machbar ist, kann im Rahmen dieses Papiers nicht in angemessener Tiefe diskutiert werden. Die Möglichkeit wird daher zunächst als gegeben angenommen und unterstellt. Technisch liegen die größten Herausforderungen in der Sicherstellung von ausreichend Flexibilität, welche auf unterschiedliche Weisen bereitgestellt werden kann:

- **Überregionaler Ausgleich** der Schwankungen von Erzeugung und Nachfrage durch ein leistungsstarkes Stromnetz,
- **Anpassung flexibler Stromnachfrage** an das Angebot Erneuerbarer Energien durch Lastmanagement und nicht-elektrische Speicher z.B. in Form von Wärme und Kälte in Gebäuden; hierzu trägt auch zusätzliche elektrische Nachfrage durch Sektorkopplung bei,
- **Speicherung** elektrischer Energie,
- Umwandlung von Strom in Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffe und deren Speicherung,
- Zusätzlich könnte angenommen werden, dass ggf. verbleibende geringe Erzeugungen aus konventionellen Kraftwerken, z.B. Gas- oder Ölturbinen ohne Netzanbindung als „**Notfallreserven**“ durch Maßnahmen im nichtenergetischen Bereich kompensiert werden könnten.

**Dabei nehmen die Kosten der EE-Integration mit zunehmenden EE-Anteilen und dem Gesamtausbau tendenziell zu.** Steigt die Stromerzeugung aus EE beispielsweise von 500 auf 600 TWh, wird die Erzeugung besonders in den Stunden erhöht, in denen im System ohnehin eine starke EE-Einspeisung anfällt. Der Aufwand der Integration einer stärkeren Nutzung fluktuierender Energien kann kaum ohne Berücksichtigung des Auslands betrachtet werden.

### 5.3.3 Welche Rolle können Stromspeicher spielen und wie kann die Fernwärme dekarbonisiert werden?

Wie bereits dargelegt ist die Bereitstellung von Flexibilität und sicherer Leistung die zentrale Herausforderung im Stromsektor. Insgesamt zeigen sich hierzu im Rahmen eines sehr starken Dekarbonisierungsziels verschiedene Pfade für den Umwandlungssektor, deren Realisierung von Entwicklungen in anderen Sektoren abhängt. Von besonderer Bedeutung sind dabei die im vorherigen Kapitel schon dargestellten Entwicklungen im Verkehrssektor.

Im vorherigen Kapitel zum Verkehrssektor wurde festgestellt, dass der Erfolg oder Misserfolg der Elektromobilität eine Kernfrage der Dekarbonisierung darstellt. Hierbei sind zwei unterschiedlich Pfade denkbar, die jeweils zu ganz unterschiedlichen Entwicklungen im Umwandlungssektor führen.

### **Szenario 1: Batterieelektrische Fahrzeuge setzen sich durch.**

In diesem Szenario verfolgt der Verkehrssektor insbesondere im PKW- und Nutzfahrzeugbereich in den kommenden Dekaden erfolgreich die Strategie einer Umstellung Richtung Elektromobilität. **Es gelingt, die Kosten von Batterien erheblich zu senken und die Fahrzeugreichweiten zu erhöhen.** Diese Entwicklung würde langfristig einen deutlichen Impuls in Richtung einer stärkeren Direktnutzung von Strom in weiteren Sektoren erzeugen. Dabei kommen zwei Effekte zum Tragen. Zum einen könnten bei einem Durchbruch im Bereich der Batteriekosten neue Speicheroptionen für den Stromsektor entstehen. Zum anderen würde die starke Nutzung der Erneuerbaren und der Elektromobilität einen entsprechenden Ausbau der Übertragungs- und Verteilungsnetze im Stromsektor erfordern. Die Verbesserung der Strominfrastrukturen könnten in diesem Fall von den weiteren Sektoren durch vermehrte Direktnutzung von Strom aufgegriffen und verstärkt werden.

Die **Bereitstellung CO<sub>2</sub>-neutraler Fernwärme** ist ein weiterer Aspekt, der in diesem Zusammenhang gelöst werden muss. Die Möglichkeiten der Nutzung von Biomasse sind begrenzt. Ebenso sind der Solarthermie aufgrund der geringen Korrelation zwischen Solarstrahlung und Nachfragespitzen Grenzen gesetzt. Anteile der Solarthermie von deutlich über 20 % an der Deckung der Gesamtwärmenachfrage sind aus diesem Grund nicht zu erwarten. **In diesem Szenario müsste die verbleibende Wärmenachfrage durch Stromdirektnutzung oder durch KWK-Kraftwerke mit CCS oder Wasserstoffnutzung gedeckt werden.** Es erscheint aber unwahrscheinlich bzw. deutlich schwieriger, eine Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen, ohne dass der Verkehrssektor dabei als „Keimzelle“ fungiert.

### **Szenario 2: Batterieelektrische Fahrzeuge setzen sich nicht durch.**

Im Falle einer 95%igen Reduktion müsste dann **Wasserstoff der zentrale Treibstoff** in der Mobilität werden, was den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur erforderlich macht. In diesem Fall stellt sich die Frage, wie die weiteren Sektoren diesen Trend aufgreifen könnten. Werden nun z.B. die Versorgungsstrukturen im Gebäudesektor ebenfalls auf Wasserstoff umgestellt oder sollte auch in diesem Szenario die Direktnutzung von Elektrizität zum Einsatz kommen? Die erwarteten hohen

Kosten einer Umstellung auf Wasserstoff als Ersatz für Erdgas sowie Umwandlungsverluste bei der Elektrolyse und Wasserstoffnutzung in weiten Bereichen der Energieversorgung lassen jedoch erwarten, dass die Stromdirektnutzung auch in diesem Szenario eine wichtige Rolle spielt.

**Für den Bereich der Fernwärmeversorgung kann jedoch die bereits vorhandene Infrastruktur für eine Wasserstoffnutzung eine wichtige Ergänzung zur Stromdirektnutzung sein.** Da in diesem Szenario vermutlich auch die Kostenreduktion von Brennstoffzellen deutlich vorangekommen sein sollte, könnten Brennstoffzellen in dieser Szenariowelt eine wichtige Erzeugungsoption für die Fern- und Nahwärmeversorgung darstellen.

**Zusammengefasst lässt sich anhand der beiden Szenarien sagen, dass die Stromdirektnutzung in einer 95%-Welt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zunimmt.** Die Bedeutung von **Wasserstoff** hängt vermutlich sehr stark von den Entwicklungen im Verkehrssektor ab, da hier ggf. ein Ankerpunkt für eine Wasserstoffinfrastruktur entstehen kann. Zur Deckung der erhöhten Stromnachfrage bestehen ausreichend Potentiale **Erneuerbarer Energien im In- und Ausland**. Der zentrale Aspekt ist in diesem Zusammenhang jedoch die Akzeptanz in der Bevölkerung.

#### **5.4 Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95%-Welt**

Der Stromsektor ist durch die direkte **Kopplung der Stromnetze mit dem Ausland** der Sektor in dem die europäische Zusammenarbeit in einer 95%-Welt die höchste Bedeutung hat. Die Kopplung über die Stromnetze birgt die Chance zum effizienten Ausgleich von Erneuerbarem Angebot und der Stromnachfrage über große Distanzen. Auf der anderen Seite treten über den Stromhandel „Carbon leakage“-Effekte ohne Verzögerung in Echtzeit auf, also die Verschiebung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verlagerung von Stromproduktion ins Ausland. Dieser Aspekt spielt eine zentrale Rolle, wenn die notwendigen Schritte zu Erreichung der Option einer 95%-Welt diskutiert werden. Im Rahmen einer 95%-Welt wird ein steigender Strombedarf vollständig durch Erneuerbare Energien und ggf. Kernenergie gedeckt. Dieses Ziel setzt einen starken Ausbau Erneuerbarer Energien und einen Verzicht auf fossile Stromerzeugung in Europa voraus.<sup>25</sup> Aufgrund der

---

<sup>25</sup> In der Herleitung von Arbeitshypothese 1 (siehe Abschnitt 2.1) wurde bereits dargelegt, dass das Verfolgen einer „95%-Strategie“ langfristig nur dann sinnvoll ist, wenn auch Europa (und der Rest der Welt) ambitionierte Klimaschutzziele verfolgen.

Langlebigkeit von Kraftwerksinfrastrukturen ist der zentrale heute notwendige Schritt, eine **gemeinsame verbindliche Übereinkunft zu dieser Zielsetzung in Europa** zu erreichen. Nur durch diese Übereinkunft im europäischen Kontext können Maßnahmen zur Beschleunigung der Dekarbonisierung eine tatsächliche Klimawirkung entfalten.

Eine Beschleunigung des Ausbaus Erneuerbarer Energien in Deutschland und insbesondere auch im Europäischen Ausland müsste in den nächsten Jahren ins Auge gefasst werden, um die notwendigen CO<sub>2</sub>-freien Stromerzeugungsmengen einer 95%-Welt in 2050 zu erreichen. Dies könnte für Deutschland bedeuten, dass der **Ausbaukorridor für die Erneuerbaren Energien im Stromsektor ggf. angehoben werden müsste**. Dies würde den in den nächsten drei Dekaden notwendigen Ausbau gleichmäßiger und damit industriepolitisch tragfähiger gestalten. Der Ausbau der Erneuerbaren Energien muss durch eine Reduktion der fossilen Stromerzeugung flankiert werden, was insbesondere die Vermeidung des Neubaus CO<sub>2</sub>-intensiver Kraftwerke betrifft, um „Stranded Investments“ zu reduzieren. Dies erfordert entsprechend hohe und verlässliche CO<sub>2</sub>-Preise oder regulatorische Eingriffe (Kohlemoratorium o.ä.). Auch hier ist wieder ein abgestimmtes europäisches Vorgehen notwendig, um Carbon leakage zu vermeiden.

**Im Bereich der Wärmeversorgung kommt dem Erhalt und dem Ausbau der Wärmenetze eine besondere Bedeutung zu.** Durch die zentrale Wärmebereitstellung ist die notwendige Umstellung der Wärmeversorgung im Rahmen einer Verschärfung der Klimaschutzziele technisch und regulatorisch deutlich einfacher. Wärmenetze können als Flexibilitätsoption bzgl. des Ambitionsniveaus des Klimaschutzes verstanden werden, da die Verschärfung der Ziele bei der Existenz von Wärmenetzen ggf. kostengünstiger möglich ist.

**Des Weiteren muss sehr zeitnah entschieden werden, ob CCS eine Rolle in der Dekarbonisierung spielen kann und soll.** Hierbei sind ebenfalls die Verknüpfungen mit dem Industriesektor zu beachten, für den CCS in einer vollständigen Dekarbonisierung ebenfalls eine verhältnismäßig günstige Reduktionsoption darstellt. Sollte CCS zum Einsatz kommen, sind zeitnah starke Änderungen der Rahmenbedingungen der Technologie anzustoßen, um mittelfristig eine Diffusion der Technologie zu erlauben und zu fördern. Sollte CCS als Option nicht verfolgt werden, müssen tragfähige Konzepte zur CO<sub>2</sub>-freien Versorgung der Fernwärmenetze unter Berücksichtigung der Restriktionen (z.B. Biomasseverfügbarkeit) sowie eine Strategie zum Umgang mit den Prozessemissionen entwickelt werden.

Abschließend soll aber die Bedeutung des europäischen Kontextes noch einmal betont werden. Im Rahmen eines 95-%-Szenarios ist es das Ziel, über Sektorkopplung durch erhöhten Stromeinsatz die Nutzung konventioneller Brennstoffe in anderen Sektoren, wie industrielle Prozesse, Mobilität und Wärmebereitstellung, nahezu vollständig zu verdrängen. Dies führt nur dann zur gewünschten CO<sub>2</sub>-Einsparung, wenn der Stromsektor stark dekarbonisiert ist. Eine alleinige Dekarbonisierung der deutschen Stromproduktion reicht in diesem Zusammenhang nicht aus, da ansonsten zur Deckung der aus der Sektorkopplung entstehenden zusätzlichen Stromnachfrage fossile Kraftwerke im Ausland eingesetzt werden. Dies im gekoppelten Strommarkt zu verhindern ist technisch und rechtlich kaum möglich. In einer Phase mit sehr niedriger EE-Einspeisung, beispielweise ausländischen Kohlekraftwerken den Zugang zum deutschen Strommarkt zu verwehren und dafür deutlich teurere Brennstoffzellenkraftwerke in Deutschland einzusetzen, ist europarechtlich nicht möglich. **Wenn der deutsche Stromsektor aber seine Flexibilität letzten Endes aus dem Einsatz fossiler Kraftstoffe aus dem Ausland bezieht, kann eine vollständige Dekarbonisierung nur auf dem Papier gelingen.**

Vor dem Hintergrund des Zielbildes in einem 95-%-Szenario lassen sich somit auch die ersten Ansätze bzgl. des regulatorischen Rahmens im Umwandlungssektor ableiten. Die Dekarbonisierung kann zum einem über vielfältige direkte regulatorische Eingriffe oder über die deutliche Stärkung des Emissionshandels bzw. eines entsprechenden CO<sub>2</sub>-Preissignals und die Flexibilisierung der Strom- und Energiemärkte geschehen. Die notwendige Sektorkopplung in einer vollständigen Dekarbonisierung mit einem sehr hohen Anteil Erneuerbarer Energien erfordert einen sehr effizienten Einsatz der Erzeugungs- und Flexibilitätsoptionen. Aufgrund der hohen Komplexität dieser Aufgabe muss bezweifelt werden, dass ein ausschließlich regulatorischer Ansatz hier zum Erfolg führt. **Einer glaubwürdigen, dauerhaften und ambitionierten Stärkung des europaweiten CO<sub>2</sub>-Preissignals kommt also zentrale Bedeutung zu.**

## 6 Industriesektor

### 6.1 Status quo

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen des Industriesektors entsprechend der Abgrenzung des Verarbeitenden Gewerbes in den Energiebilanzen behandelt. Es werden sowohl die Emissionen aus Energiewandlung wie auch der Industrieprozesse (z.B. CO<sub>2</sub>, welches bei der Kalzinierung von Zementklinker entsteht) berücksichtigt.

Wenngleich der strukturelle **Wandel hin zu einer dienstleistungsbasierten Industrie** zu einer leichten Entkopplung von Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum führt, ist die Industrie in Deutschland im europäischen Vergleich noch immer durch einen **hohen Anteil energieintensiver Schwerindustrie** geprägt (z.B. Stahl, Chemie, Baumaterialien). Zwar hat die Grundstoffindustrie nur einen geringen Anteil an der Wertschöpfung, jedoch ist sie für über 50 % des Energieverbrauchs der Industrie verantwortlich.

In 2014 war der Industriesektor mit 697 TWh für **29 % der Endenergienachfrage verantwortlich** [BMWi 2015]. Dabei wurden 58 % der Nachfrage durch den dezentralen Einsatz fossiler Brennstoffe gedeckt, 31 % durch Strom und 8 % durch Fernwärme (siehe Abbildung 11). Da Strom und Fernwärme zu großen Teilen ebenfalls durch fossile Energieträger erzeugt werden, ist der gesamte fossile Primärenergiebedarf des Sektors deutlich höher.

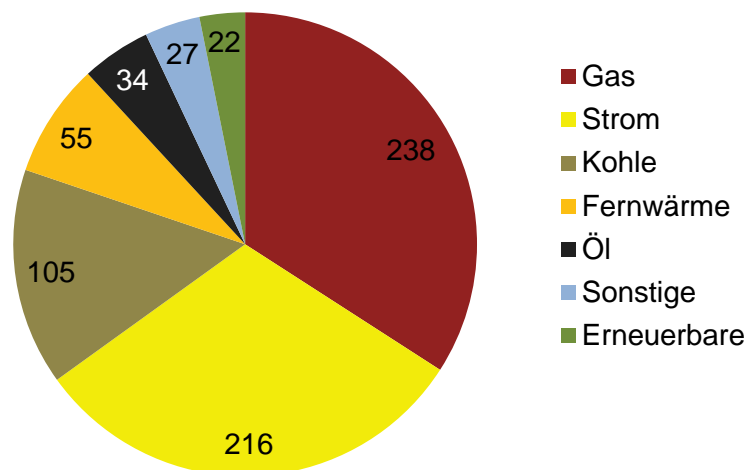


Abbildung 10: Endenergieverbrauch der Industrie im Jahr 2014 in TWh. Eigene Darstellung nach [BMWi 2017]

Abbildung 12 zeigt den Anteil der Energieformen am Endenergieverbrauch. Im Zeitraum seit 1990 hat die Bedeutung von schwerem Heizöl kontinuierlich abgenommen, sodass es 2014 nur noch 0,4 % des Endenergieverbrauchs der Industrie ausmacht. Leichtes Heizöl ist im gleichen Zeitraum auf 1,4 % gefallen. Der Einsatz von Erneuerbaren Energieträgern und Fernwärme ist seit dem Jahr 2000 gestiegen, er unterliegt jedoch auch deutlichen Schwankungen. Erdgas, Strom und Steinkohle waren über den ganzen Zeitraum von 1990 bis 2014 die dominierenden Energieträger. **Besonders die Trends der letzten Jahre zeigen keinen deutlichen Wandel hin zu CO<sub>2</sub>-armen Energieträgern.**

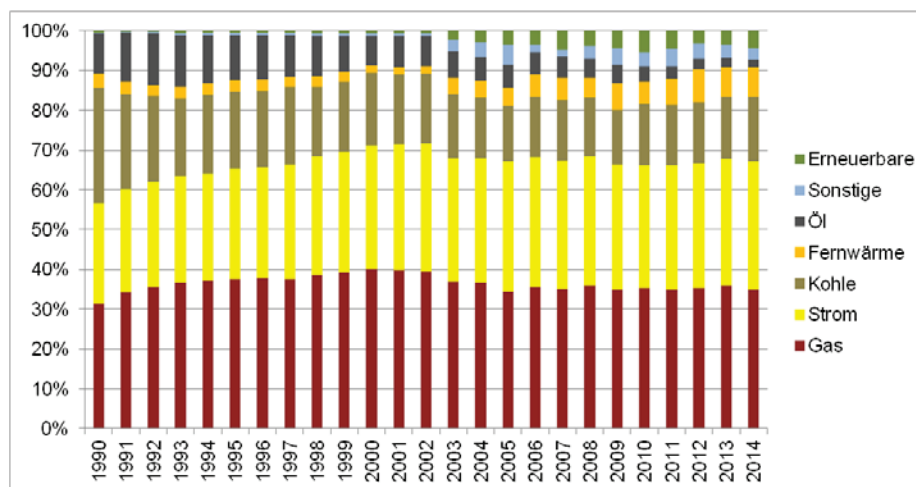


Abbildung 11: Entwicklung der Anteile der Energieformen am Endenergieverbrauch der Industrie. Eigene Darstellung nach [BMWi 2017]

Im Jahr 2013 lagen die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Industrie bei 125 Mt CO<sub>2</sub> während die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen 45 Mt CO<sub>2-equ</sub> betragen [BMWi 2017]. In Summe war die Industrie damit für 21 % der gesamten THG-Emissionen in Deutschland verantwortlich. Wie der Endenergieverbrauch haben sich auch die **energiebedingten Emissionen der Industrie seit dem Jahr 2000 auf einem konstanten Niveau gehalten** (siehe Abbildung 13). Bei den **prozessbedingten Emissionen hingegen ist im gleichen Zeitraum ein leichter Rückgang** zu beobachten.

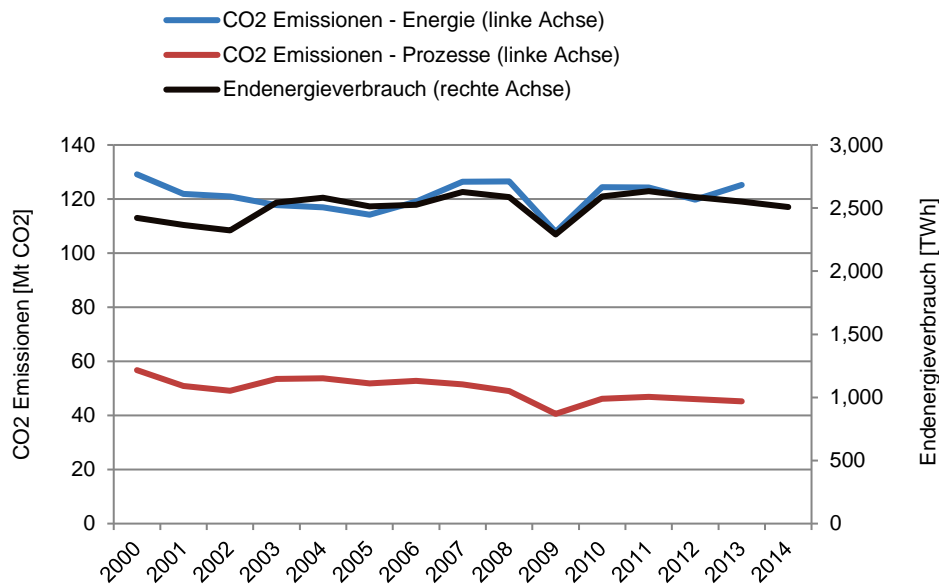


Abbildung 12: CO<sub>2</sub>-Emissionen und Endenergieverbrauch des Industriesektors. Eigene Darstellung nach [BMW i 2017]

## 6.2 Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

Im Folgenden wird auf Modellergebnisse des Basisszenarios des Projekts „Langfristszenarien“ zurückgegriffen, die mit dem Modell *FORECAST* berechnet wurden.

**Im Basisszenario verbleibt im Industriesektor im Jahr 2050 ein nichtregenerativer Primärenergieeinsatz von 188 TWh, größtenteils handelt es sich dabei um Erdgas.** Daraus resultieren energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 44 Mt CO<sub>2</sub> und prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 22 Mt CO<sub>2</sub> in 2050. **Mittels CCS-Technologie werden davon im Jahr 2050 etwa 35 Mt abgeschieden und gespeichert,** aufgeteilt auf die Branchen Grundstoffchemie, Metallherzeugung und Zementherstellung.

Die verbleibenden etwa 31 Mt CO<sub>2</sub>-Emissionen sind mit etwa 10 Mt zu einem großen Teil auf die Verarbeitung von Steinen und Erden (vorwiegend Zement) zurückzuführen. Die weiteren 21 Mt verteilen sich relativ gleichmäßig auf die einzelnen Branchen und entstehen vorwiegend aus der Nutzung von Erdgas (ca. 100 TWh). Die Nutzung anderer fossiler Energieträger wie Heizöl und Kohle läuft im Basisszenario fast vollständig aus – lediglich in der Stahlindustrie wird noch Kohle genutzt. Es werden ca. 120 TWh Biomasse in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt.



Tabelle 5: THG-Emissionen im Industriesektor im Basisszenario der Langfristszenarien für das Jahr 2050 [Mt CO<sub>2</sub>]

Branche						Abzug	Netto
	Erdgas	Kohle	Sonstige	Prozess	Summe	CCS	
Ernährung und Tabak	2.5	0.6	-	-	3.1	-	3.1
Fahrzeugbau	0.8	0.2	0.1	-	1.1	-	1.1
Gew. von Steinen und Erden	0.2	0.1	0.0	-	0.2	-	0.2
Glas u. Keramik	2.1	0.1	-	1.3	3.4	-	3.4
Grundstoffchemie	7.5	0.6	1.8	9.9	19.8	21.1	- 1.3
Gummi- u. Kunststoffwaren	0.3	0.1	-	-	0.4	-	0.4
Maschinenbau	0.8	0.1	-	-	0.9	-	0.9
Metallbearbeitung	1.1	0.2	-	-	1.3	-	1.3
Metallerzeugung	3.2	8.8	1.0	-	12.9	9.6	3.4
NE-Metalle- gießereien	1.3	1.0	0.2	0.5	3.1	-	3.1
Papiergewerbe	1.0	0.8	-	-	1.8	-	1.8
Sonstige chemische Industrie	1.2	0.3	-	-	1.5	-	1.5
Sonstige Wirtschaftszweige	1.6	0.4	-	-	2.0	-	2.0
Verarbeitung v. Steine u. Erden	2.2	1.3	0.9	10.5	14.9	4.6	10.3
<b>Summe</b>	<b>25.6</b>	<b>14.7</b>	<b>4.0</b>	<b>22.2</b>	<b>66.6</b>	<b>35.3</b>	<b>31.3</b>

**Erläuterungen:** Prozessemissionen bezeichnen die nichtenergetischen Emissionen, z.B. das beim Klinkerbrennen entstehende CO<sub>2</sub>. In der chemischen Industrie entsteht über Biomasse-CCS eine leicht negative Emissionsbilanz. Der energetische Mehraufwand für CCS ist bereits im Energieverbrauch und den THG-Emissionen der einzelnen Branchen berücksichtigt.

**Bezüglich des technologischen Wandels bewegt sich das Basisszenario zwischen einer evolutionären und einer radikalen Veränderung.** Im Einzelnen sind folgende Entwicklungen die zentralen Elemente des Wandels.

- **Innovative Herstellungsverfahren** kommen in den Markt und erreichen bis 2050 hohe Marktanteile.
- Der bereits erwähnte **Einsatz von CCS** vermeidet einen noch grundlegenden Wandel bei einigen energieintensiven Produktionsprozessen (z.B. Stahl-, Ethylen-, Ammoniak-, und Zementherstellung).
- Es findet ein ambitionierter **Trend hin zu mehr Recycling und Sekundärproduktion** statt (u.a. Sekundäraluminium, Elektrostahl, Recyclingpapier). Z.B. steigt der Anteil von Elektrostahl von 29 % in 2010 auf 57 % in 2050.
- **Ausschöpfung der Effizienzpotenziale bei Querschnittstechniken** wie Elektromotoren (z.B. Pumpen und Druckluft), Dampferzeugern und Beleuchtung.
- **Power-to-heat** spielt ab 2040 eine wichtige Rolle und steigt auf ca. 21 TWh bis 2050. Es substituiert KWK-Anlagen, die besonders im Zeitraum bis 2030 bedeutend sind.

### 6.3 Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

Entsprechend der verbleibenden Emissionen und der umgesetzten technischen Vermeidungsoptionen verbleiben folgende technische Möglichkeiten für eine weitere Reduktion der THG-Emissionen:

- Stärkere **Förderung/Forcierung von Energieeffizienz**, insbesondere im Bereich der Abwärmenutzung in Kombination mit industriellen Großwärmepumpen.
- Noch einmal **deutlich verstärkter Einsatz von Power-to-heat**, um die auf viele Branchen verteilte Nutzung von Erdgas zu substituieren.
- Einsatz von **EE-Wasserstoff in Stahl- und Chemieindustrie** zum Ersatz von Kohle und Erdgas. Zwar würden die Auswirkungen auf die Emissionsbilanz im Basisszenario im Jahr 2050 nicht sehr groß sein, da entsprechende Emissionen bereits zu einem Großteil über CCS abgedeckt und gespeichert werden, jedoch muss der Einsatz von CCS in diesem Maße ohnehin als ambitioniert angesehen werden. Wichtig ist auch die Evaluation alternativer Reduktionsstrategien, die auch langfristig nachhaltig sind, da CCS durch beschränkte Speicherpotentiale immer nur eine Brückentechnologie darstellt. So ist es z.B. bei der Ammoniak-synthese und der Methanolherstellung möglich, den benötigten Wasserstoff anstatt über Dampfreformation oder partielle Oxidation mit EE-Strom über Elektrolyse herzustellen. Im Jahr 2050 könnten so 25 (Ammoniak) bzw. 15 TWh Erdgas (Methanol) durch etwa die gleiche Energiemenge EE-Strom ersetzt werden [Wietschel et al. 2015].
- Zusätzliche **Steigerung bei Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft** sowie Substitution energieintensiver Produkte.
- Schnellerer und umfassenderer **Umstieg auf innovative, hocheffiziente Herstellungsverfahren**, insbesondere bei den energieintensiven Grundstoffen wie Zement.

Der Industriesektor ist durch einen **sehr heterogenen Einsatz von Energie** gekennzeichnet. Die Struktur der eingesetzten Techniken und Energieträger unterscheidet sich stark zwischen den Branchen und Prozessen. Entsprechend ist eine Transformationsstrategie vergleichsweise kleinteilig und Politikinstrumente müssen diese Heterogenität berücksichtigen. Besonders die Potenziale einer Substitution energieintensiver Produkte spiegeln sich in kleingliedrigen und vielfach spezialisierten Märkten wider.

Im Vergleich zum Gebäudesektor weist eine Modernisierung bestehender Anlagen nur vergleichsweise **geringe Einsparpotenziale** auf, da besonders die energieintensiven Prozesse bereits weitgehend optimiert wurden. Entsprechend ist für einen ambitionierten Reduktionspfad ein **Austausch bestehender Anlagen unerlässlich**. Zukünftig ist für die energieintensive Grundstoffindustrie nicht von einem Wachstum auszugehen, sondern eher von einer Stagnation der (Tonnen-)Produktion. Entsprechend wird es kaum Zubau von Produktionskapazitäten geben und neue Anlagen kommen nur über den Austausch bestehender Anlagen in den Bestand.

Wie der Umwandlungssektor weist auch der Industriesektor – insbesondere im Bereich der energieintensiven Grundstoffindustrie – einen **sehr langlebigen Anlagenbestand** auf. Dieser erfordert eine möglichst frühzeitige Umstellung auf neue hocheffiziente Herstellungsverfahren. Damit diese bis 2050 möglichst umfassend durch den Anlagenbestand diffundiert sind, muss die **Markteinführung vor 2030** beginnen.

Erschwerend kommt hinzu, dass einige der notwendigen Technologien (z.B. CCS, CO<sub>2</sub>-arme Zementtypen, Stahlherstellung mit EE-H<sub>2</sub>) noch nicht marktreif sind bzw. sich noch in Entwicklungs- und Pilotphasen befinden.

**Weiterhin ist der bestehende Mix an Politikinstrumenten im Industriesektor noch weit davon entfernt, die notwendige Transformation anzustoßen.** Wenngleich gerade in den letzten Jahren neue Instrumente eingeführt wurden, wie z.B. eine umfassende Pflicht zu Energiemanagement, gibt es derzeit z.B. keinen Anreiz für Unternehmen, die nicht am EU Emissionshandel teilnehmen, Brennstoffwechsel hin zu weniger CO<sub>2</sub>-intensiven Energieträgern durchzuführen. Im Basisszenario der Langfristszenarien wurde dieser durch eine CO<sub>2</sub>-Steuer stimuliert, welche dem Niveau des CO<sub>2</sub>-Zertifikatepreises entspricht. Viele Effizienztechniken und emissionsarme Prozesse sind aus Unternehmenssicht erst bei deutlich höheren Energiepreisen und dem Wissen um ein zukünftiges, als **sicher anzunehmendes Ansteigen der CO<sub>2</sub>-Preise** wirtschaftlich.

Gleichzeitig befinden sich viele Bereiche der Industrie **im internationalen Wettbewerb**, weshalb zusätzliche Belastungen schwer durchsetzbar sind bzw. **ein international abgestimmtes Vorgehen** verlangen.

**Kreislaufwirtschaft** („circular economy“) inklusive Kaskadennutzung und Bioökonomie sind inzwischen zwar auch international stark diskutierte Konzepte, die zunehmend auch in der Industrie langfristig als unumgängliche Paradigmen aufgenommen werden. Die Kaskadennutzung beschreibt dabei den materiellen Erhalt

von Rohstoff über eine Abfolge von Recycling oder Downcycling und einer energetischen Verwertung am Ende des Produktlebenszyklus. Das strategische Ziel der Bioökonomie besteht in der Nutzung biologischer Ressourcen wie Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen, um die knapper werdenden Rohstoffe und Energiequellen ersetzen zu können.

Im „Maßnahmenbeispiel: Alternativen in der Materialnutzung von Beton und Stahl“ ist am großen Marktsegment „Bauwirtschaft“ dargestellt, welche Potenziale überschlägig möglich sein können. Die dabei abgeschätzten 4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Ersatz von Baustahl durch Konstruktionsholz geben eine Orientierung über die mögliche Größenordnung. Politisch stehen Maßnahmen zur verstärkten Substitution fossiler wie auch mineralischer/metallischer Materialien Rohstoffe im Einklang mit den Zielen der Bioökonomie.

### Maßnahmenbeispiel

#### Alternativen in der Materialnutzung von Beton und Stahl

Zement (bzw. Beton) und Stahl sind die dominierenden Materialien im Sektor der Baustoffherstellung. Beide Produkte weisen vergleichsweise hohe Kohlenstofffußabdrücke auf:

Zement ca. 1 CO<sub>2</sub> je Tonne Produkt  
 Beton ca. 0,13 t CO<sub>2</sub> je Tonne Produkt  
 Stahl ca. 1 t CO<sub>2</sub> je Tonne Produkt.

Mit Holz bietet sich ein nachwachsender Rohstoff als eine Alternative mit grundsätzlich deutlich geringeren THG-Emissionen an. Entscheidend ist dabei allerdings die Sicherstellung der Nachhaltigkeit, d.h. keine zusätzliche Entnahme von Holz mengen aus dem Wald in Deutschland (und keine Holzimporte), sondern Umlenkung des bisher fast ausschließlich energetisch genutzten Laubholzes in die stoffliche Nutzung.

#### Maßnahmen/Ausgestaltung für vollständige Dekarbonisierung

Das Ziel der Maßnahmen ist die Umlenkung des grundsätzlich verfügbaren Holzstoffstroms, z.B. in die Herstellung von hochwertigem Konstruktionsholz, wie Konstruktionsschichtholz, aus Buchenholz zum Ersatz von Baustahl, wie z.B. Stahlträgern. Überschlägig lässt sich Holz für 2 Mio. Tonnen Konstruktionsholz pro Jahr mobilisieren und damit 4 Mio. t Baustahl (= 30 % des Gesamtverbrauchs an Langstahl) ersetzen (eigene Berechnungen auf der Basis von [Mantau 2012; Gärtner et al. 2013; Rüter und Diederichs 2012]). In der THG-Bilanz stehen dann 0,07 Mio. t CO<sub>2</sub> für die Herstellung des Konstruktionsholzes einer Vermeidung von 4 Mio. t CO<sub>2</sub> gegenüber.

#### Zentrale Hemmnisse

Trotz eines erkennbaren Trends zu mehr Holz im Bauwesen ist die Umstellung in architektonischen Konzepten sehr langsam. Die Sägewirtschaft ist bisher nicht auf eine größere Verarbeitung von Laubholz eingestellt. Bei Nadelholz bestehen im Übrigen keine relevanten Ausbaupotenziale.

Weiterhin ist zu beachten, dass die infrage kommenden Holzsortimente derzeit überwiegend als Scheitholz und Hackschnitzel zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Auch hier ist eine Substitution erforderlich, die mit konkurrierenden Konflikten gerade im Falle einer vollständigen Dekarbonisierung verbunden sein wird.

Für die Gesamtbilanz ist erforderlich, dass der Wegfall der Wärme durch Holzfeuerung nicht durch fossile Brennstoffe, sondern durch andere erneuerbare Quellen bzw. steigende Effizienz ausgeglichen wird. Für den Weg in die verstärkte stoffliche Nutzung von Laubholz spricht der politisch beschlossene Umbau des Waldes von Nadeldominanz auf naturnäheren und klimarobusteren Laubwald. Dies übt bereits Druck auf die Holzbranche aus, sich stärker der Laubholznutzung zu öffnen.

## 6.4 Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95-%-Welt

Aufgrund der **Langlebigkeit des Anlagenbestandes** ist in vielen Bereichen der Industrie eine relativ baldige Weichenstellung erforderlich, die **bereits bis 2030 eine umfassende Markttransformation** herbeiführt. Im Folgenden werden einige wichtige Handlungsfelder diskutiert.

Auch **Unternehmen, die nicht am Emissionshandel teilnehmen**, benötigen einen Anreiz, verstärkt CO<sub>2</sub>-ärmere Energieträger zu nutzen. Dies könnte beispielsweise durch eine **CO<sub>2</sub>-Steuer oder eine Subvention von Erneuerbaren Energien** zur Wärmeerzeugung umgesetzt werden. Erneuerbarer Strom (über Power-to-heat) könnte dazu beitragen, die über viele Branchen und Prozesse verteilte Nutzung von Erdgas zu ersetzen. Auch die Nutzung von Abwärme in Kombination mit Großwärmepumpen weist über das Basisszenario der Langfristszenarien hinaus noch weiteres Potenzial auf.

Für frühzeitige Investitionen in Energieeffizienz und Erneuerbare Energien ist es zentral, dass die Unternehmen in ihren **Investitionsplanungen** einen steigenden CO<sub>2</sub>-Preis antizipieren, da Investitionen häufig sehr langlebig sind und die CO<sub>2</sub>-Preise im Emissionshandel bis 2030 vermutlich noch auf einem relativ niedrigen Niveau bleiben (auch im Basisszenario der Langfristszenarien erreicht der CO<sub>2</sub>-Preis im Jahr 2030 lediglich 35 Euro/t CO<sub>2</sub>).

In vielen Bereichen der **energieintensiven Grundstoffindustrie** sind die verbleibenden Effizienzpotenziale durch Modernisierung oder den Einsatz von bester verfügbarer Technik vergleichsweise niedrig (häufig maximal 10 %). Es werden daher **neue Herstellungsverfahren** benötigt, die sich teilweise schon in der Forschung und Entwicklung befinden. Eine gezielte **Förderung der Forschung und Entwicklungs (F&E)-Aktivitäten** muss dazu beitragen, dass diese Verfahren möglichst schon in den kommenden Jahren die Marktreife erlangen. In häufig konservativen Branchen ist danach eine Förderung der Markteinführung über z.B. Demonstrationsanlagen unerlässlich. Dies trifft generell auf die gesamte Grundstoffindustrie zu; aufgrund der hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen (und der zusätzlich prozessbedingten Emissionen) allerdings besonders auf die Herstellung von Zement und Stahl (siehe auch „Maßnahmenbeispiel CO<sub>2</sub>-arme Zementtypen“ weiter unten). Mögliche Technologien sind hier CO<sub>2</sub>-arme Zementtypen, eine Stahlerzeugung über Direktreduktion mit Hilfe von aus EE-Strom erzeugtem Wasserstoff und endabmessungsnahes Stahlgießen. In anderen Bereichen sind Technologien wie die

inerten Anoden für die Primäraluminiumherstellung, Magnetheizer beim Aluminiumverarbeiten oder die Sauerstoffverzehrkathoden in der Chlorherstellung in der Diskussion. **Der Emissionshandel allein wird ohne unterstützende Instrumente nicht in der Lage sein, diese neuen Verfahren zeitgerecht auf den Markt zu bringen;** dafür ist die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Preise bei den sehr langen Entwicklungszeiten (über 10 Jahre bis zur Markteinführung) zu unsicher.

**Die notwendige frühe Förderung von F&E-Aktivitäten trifft auch auf CCS zu,** falls diese Technologie zumindest als Option im Zeitraum ab 2030 eingesetzt werden sollte. Dies dürfte insbesondere relevant sein, wenn es nicht gelingt, neue CO<sub>2</sub>-arme Zementtypen am Markt zu etablieren, oder dass die Stahlindustrie auf andere Verfahren umstellt. CCS bietet eine Option, die über den Zeitraum bis 2050 (und danach) kumulierten Emissionen zu senken, bzw. senkt das Risiko einer Zielverfehlung, falls neue Herstellungsverfahren erst später auf den Markt kommen.

In der **Stahlindustrie** sind CO<sub>2</sub>-freie Verfahren durchaus vorstellbar. Die Direktreduktion in Kombination mit EE-Wasserstoff könnte beispielsweise eine wichtige Rolle spielen. Aufgrund langer Innovationszyklen und Anlagenlebensdauern ist erst ab 2030 mit einer Markteinführung der Direktreduktion mit Wasserstoff zu rechnen. Die zeitlich variable Erzeugung des Elektrolyse-Wasserstoffs kann damit auch die Integration der Solar- und Windenergie erleichtern, wenn Wasserstoffspeicher genutzt werden. Würde die gesamte Oxygenstahlproduktion des Jahres 2050 des Basisszenarios der Langfristszenarien von 16,5 Millionen Tonnen auf Direktreduktion mit Wasserstoff umgestellt, wäre mit einem zusätzlichen Stromverbrauch von etwa 70 TWh pro Jahr zu rechnen [basierend auf Fishedick et al. 2014]. Eine entsprechende Markteinführung bis 2030 verlangt bereits heute verstärkte Aktivitäten bei F&E sowie Demonstratoren.

Ähnliche Möglichkeiten bietet auch die Chemieindustrie. Für die **Ammoniaksynthese** nach Haber-Bosch-Verfahren werden Stickstoff und Wasserstoff eingesetzt. Der Wasserstoff wird derzeit über Dampfreformation oder partielle Oxidation aus Erdgas gewonnen. Eine Umstellung auf Elektrolyse-Wasserstoff wäre mit heutigen Techniken möglich. Abhängig von der Stromerzeugung kann die Ammoniakherstellung so vollständig CO<sub>2</sub>-neutral werden. Bei einer weitgehenden Umstellung könnten so im Jahr 2050 25 TWh Erdgas durch etwa die gleiche Energiemenge Strom ersetzt werden [Wietschel et al. 2015]. In ähnlicher Weise könnte auch der Wasserstoffbedarf für die Herstellung von Methanol anstatt über Dampfreformation über Elektrolyse hergestellt und so im Jahr 2050 etwa 15 TWh Erdgas durch etwa 15 TWh Strom substituiert werden [Wietschel et al. 2015].

Ein hohes, bisher kaum ausgeschöpftes und wenig untersuchtes Potenzial liegt im Ausbau von **Materialeffizienz und der Kreislaufwirtschaft**. Laut Allwood et al. [2011] kann man vier Strategien der Materialeffizienz unterscheiden:

- Längere Lebensdauer von Produkten
- Modularisierung und Wiederaufarbeitung („remanufacturing“)
- Wiederverwendung von Produkten
- Weniger Material verwenden, um den gleichen Nutzen bereit zu stellen.

Am obigen „Maßnahmenbeispiel: Alternativen in der Materialnutzung von Beton und Stahl“ wird beispielhaft diskutiert, welche Vorteile die Nutzung von Holz anstatt Beton und Stahl in der Bauwirtschaft haben könnte und welche Hemmnisse diese Entwicklung derzeit behindern. Die Umsetzung wird jedoch erhebliche Anstrengungen und konkrete Maßnahmen verlangen, wie die im Entwurf diskutierte Richtlinie für Holzbauweise.

**Wenngleich eine Steigerung von Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft weniger von lock-in Effekten betroffen ist, so sind dennoch bereits heute Maßnahmen und Weichenstellungen nötig.** Alleine aufgrund der Vielzahl der betroffenen Akteure auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette kann in diesem Feld kein abrupter Wandel stattfinden. Hinzu kommen die langen Zeiträume, die z.B. vom Beschluss einer Umnutzung des Waldes bis zur tatsächlichen Holzernte vergehen.



### Technologiebeispiel: CO<sub>2</sub>-arme Zementtypen

Bei der Herstellung **einer Tonne Zementklinker** entstehen aktuell etwa **900 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen**. Diese setzen sich aus etwa 500 kg prozessbedingten Emissionen durch die Entsäuerung des Kalksteins sowie etwa 400 kg energiebedingten Emissionen zusammen. Durch Prozessoptimierung und Verwendung von bester verfügbarer Technik sind zusätzliche Effizienzgewinne von weniger als 10 % zu erwarten [Brunke und Blesl 2014]. **Die prozessbedingten Emissionen können mit derzeit verfügbaren Techniken nicht reduziert werden.** Es kann lediglich der Einsatz von Klinker vermindert werden, indem z.B. alternative Zuhilfenstoffe wie Hochofenschlacke genutzt werden.

Es wird an radikal neue Herstellungsverfahren geforscht, welche sowohl den Energiebedarf der Herstellung als auch die prozessbedingten Emissionen deutlich reduzieren würden (Stichwort: **Low-carbon cements**) [Schneider et al. 2011]. Die Projekte befinden sich derzeit in der Pilotphase und sind noch nicht kommerziell verfügbar.

In Deutschland wurde 2009 die Celitement GmbH gegründet, welche eine entsprechende Entwicklung zur Marktreife bringen soll [Stemmermann et al. 2010]. Celitement könnte die mit der Zementherstellung verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen um mindestens 50 % reduzieren [Stemmermann et al. 2010]. Weitere Entwicklungen in Deutschland sind nicht bekannt.

#### Zentrale Hemmnisse

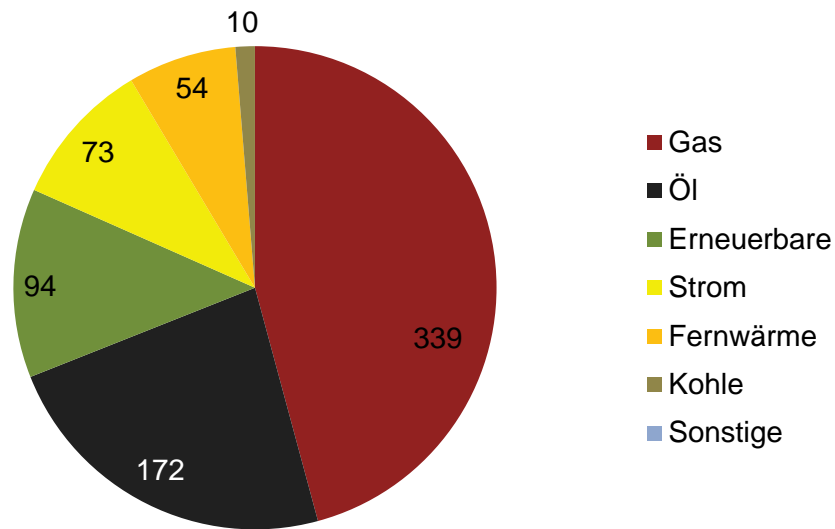
Eine Vielzahl von Hemmnissen wurde identifiziert, welche die Entwicklung und Markteinführung von radikal neuen Herstellungsverfahren in der Zementindustrie behindern. Als wichtigste sind basierend auf Dewald und Achternbosch [2015] zu nennen:

- Sehr **langwieriger Standardisierungsprozess** für neue Zementsorten erschwert deren Markteinführung.
- **Wenig Wettbewerb** in einem ohnehin oligopolistischen Markt (verstärkt durch regional aufgeteilte Märkte, da Zement nur wenige hundert Kilometer transportiert wird). Wettbewerb findet hauptsächlich über Preise und großtechnische Anlagen statt.
- Zement ist ein „low-tech“-Produkt mit **geringer Wertschöpfung** in einem Markt mit national geringer ökonomischer Bedeutung (ca. 7000 Beschäftigte, ca. 2 Milliarden Euro Umsatz).
- Bisherige **Forschung war nachfragegetrieben** und auf inkrementelle Verbesserungen bestehender Verfahren und Produkte ausgelegt. Grundlagenforschung wurde kaum durchgeführt, was die Entwicklung von radikal neuen Ansätzen verhinderte.
- Nach der Markteinführung muss sich die Technik gegen einen zum Großteil abgeschriebenen **Anlagenbestand mit sehr langer Lebensdauer durchsetzen**. Die Markteinführung für Celitement wird in kleinen Nischen etwa im Jahr 2020 erwartet nach über 10 Jahren F&E.

## 7 Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung

### 7.1 Status quo

Die Wärmeversorgung in Gebäuden ist für einen großen Teil der Energienachfrage Deutschlands verantwortlich und erfolgt weiterhin zu großen Teilen aus fossilen Energieträgern. Abbildung 14 stellt den Endenergieverbrauch für Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung in Wohn- und Nichtwohngebäuden des GHD-Sektors dar. Der Gesamtwärme- und Kältebedarf in diesen Gebäuden betrug 740 TWh (nicht klimabereinigt) im Jahr 2014, was **rund 31 % der gesamten Endenergienachfrage Deutschlands** entspricht. Wie in Abbildung 14 ersichtlich, werden dabei 70 % des Energiebedarfs durch dezentralen Einsatz von fossilen Energieträgern gedeckt, insbesondere durch Erdgas (46 %) und zu 23 % durch Ölheizungen. Dezentrale Erneuerbare Energieträger decken insgesamt rund 13 % des Wärme- und Kälteendenergiebedarfs in Gebäuden, wobei Biomasse mit ungefähr 10 % den weitaus größten Anteil ausmacht.



Quelle: Eigene Darstellung nach [BMWi 2017]

Abbildung 13: Endenergieträgermix in TWh zur Bereitstellung von Wärme und Kälte in Wohn- und GHD-Gebäuden im Jahr 2014

Dazu kommt ein signifikanter Anteil der Sekundärenergieträger Strom (10 %) und Fern- bzw. Nahwärme (7 %). Der Energiemix zur Bereitstellung dieser beiden Energieträger ist ebenfalls vorwiegend von fossilen Energieträgern dominiert, **wodurch sich bei einer reinen Primärenergiebetrachtung ein noch höherer fossiler Anteil von über 80 % ergibt.**

Versorgungsseitig gibt es seit über zehn Jahren einen **Trend zu gasbefeuerten Brennwertkesseln**, die in den letzten Jahren Marktanteile von über 60 % am Wärmeerzeugerabsatz aufweisen konnten [BDH 2015]. Dies bedeutet gegenüber älteren Heizsystemen wie Standard- und Niedertemperaturkesseln zwar Effizienzsteigerungen, für eine weitgehende Dekarbonisierung müssten aber die Marktanteile von Erneuerbaren Energien basierten Wärmeerzeugern in den kommenden Jahren stark steigen. **Generell gibt es aber derzeit kaum Anzeichen für eine grundlegende Substitution von Erdgas im Bereich der Wärmebereitstellung.** Vielmehr stagnieren die Marktanteile primärer erneuerbarer Wärmeerzeuger (Wärmepumpen, Biomassekessel) und liegen heute unter dem Marktanteil Jahres 2008. Nur im Neubaubereich konnten Wärmepumpen einen signifikanten Marktanteil an den Installationszahlen erreichen. Dieser ist in den letzten 20 Jahren kontinuierlich gestiegen und betrug im Jahr 2014 rund 30 % [destatis 2015a]. In den letzten drei Jahren ist der Anteil der Neubauten mit Wärmepumpen als primäres Heizsystem allerdings leicht zurückgegangen.

Einen positiven Effekt auf die Installationszahlen erneuerbarer Heizsysteme durch das im Jahr 2009 eingeführte EEWärmeG ist aus den statistischen Daten nicht abzuleiten. Der Absatz solarthermischer Kollektoren war in den letzten Jahren starken Schwankungen ausgesetzt und ist seit dem Jahr 2011 rückläufig [BSW-Solar 2016]. Dabei waren die Installationszahlen in der Vergangenheit insbesondere von den Förderbedingungen des Marktanzreizprogramms abhängig, was durch zeitweise Aussetzung der Förderungen zu signifikantem Rückgang in den Neuinstallationen geführt hat. Im Neubau hat sich der Gas-Brennwertkessel in Kombination mit einer Solarthermieanlage als eine Standardtechnologie etabliert, was auch durch die Anforderungen des EEWärmeG und der Energieeinsparverordnung (EnEV) bedingt ist.

Auf Seiten der Gebäudeeffizienz entsprechen die thermischen Qualitäten von Neubauten hohen Effizienzstandards. Mit der letzten Novellierung der EnEV sind diese für Neubauten ab dem Jahr 2016 noch einmal um 25 % verschärft worden. Allerdings wurden die Anforderungen bei der Sanierung bestehender Gebäude nicht weiter verschärft. Bezüglich hocheffizienter und umfassender Sanierungen gibt es Fortschritte, die insbesondere durch die Förderprogramme der Kreditanstalt für

Wiederaufbau (KfW) und die damit verbundene Etablierung der KfW-Effizienzhäuser bedingt werden. Der Gebäudebestand an sich entspricht allerdings immer noch weitgehend nicht den technisch umsetzbaren Effizienzstandards. **80 % des Bestandes weisen etwa noch immer einen Heizwärmebedarf von mehr als 100 kWh/m<sup>2</sup>·a auf.**

Diese Zahlen und Entwicklungen belegen einerseits das **hohe CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzial im Gebäudesektor**, andererseits aber auch die **notwendigen Umstrukturierungen in der Wärmebereitstellung**. Diese lässt sich nur durch eine Kombination aus Effizienzsteigerungen durch Sanierung der Gebäudehüllen und starken Anreizen zum Umstieg auf erneuerbare Wärmetechnologien erzielen. Eine Voraussetzung für signifikante Reduktionen der Treibhausgase ist auch eine Steigerung der Erneuerbaren Energien in den Umwandlungssektoren Strom und Fernwärme.

## 7.2 Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

Im Folgenden wird auf Modellergebnisse des Basisszenarios des Projekts „Langfristszenarien“ zurückgegriffen, die mit dem Modell *Invert/EELab* durchgeführt wurden. In diesem Szenario werden CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen von 80 % im Gebäudebereich bis 2050 erreicht.

Dazu wurden im Wesentlichen die folgenden Maßnahmen abgebildet bzw. Annahmen getroffen:

- Die **beheizten Flächen** steigen in den kommenden Dekaden von 2012 bis 2050 insgesamt um etwa 12 % an, wobei ein überproportionales Wachstum bei Mehrfamilienhäusern angenommen wird (Klimaschutzszenario 2050, Repenning et al 2014).
- Des Weiteren wird angenommen, dass **die energie- und klimapolitischen Gebäudemaßnahmen mindestens weitergeführt** werden, in vielen Fällen sogar verstärkt werden müssen. An ordnungspolitischen Maßnahmen wurde angenommen, dass bis zum Jahr 2020 ein weiterer Schritt in Richtung EnEV-Verschärfung vorgenommen wird und eine weitere Verschärfung im Jahr 2030. Diese betrifft vor allem eine Verschärfung der Anforderungen an die Sanierung bestehender Gebäude. Als weiteres zentrales ordnungsrechtliches Instrument wird die Nutzungspflicht für Erneuerbare Energien des EEWärmeG auf den Gebäudebestand ausgeweitet, wobei der Auslösetatbestand zunächst auf die grund-

legende Sanierung von Gebäuden beschränkt ist. Bei der Nutzungspflicht wird von einem geforderten EE-Wärme-Anteil von 70 % im Jahr 2050 ausgegangen. Dies ist für jedes Gebäude zu erfüllen, für das der Auslösetatbestand der Nutzungspflicht vorliegt (also z.B. Neubau oder Sanierung).

- Ab dem Jahr 2035 wird der Auslösetatbestand für die erneuerbare Wärme-Nutzungspflicht auf den Heizkesseltausch erweitert, sodass diese nicht nur beim Neubau sowie bei umfassenden Sanierungen zum Tragen kommt. Diese Maßnahmen, insbesondere auch die Ausweitung der Nutzungspflicht auf den Gebäudebestand sind als durchaus ambitioniert zu werten, insbesondere unter Berücksichtigung der aktuellen politischen Diskussionen zum EEWärmeG.

Um darzustellen, wie der Gebäudesektor im Falle einer vollständigen Dekarbonisierung aussehen kann bzw. muss, soll zunächst kurz erläutert werden, wie die Transformation im Falle einer 80%igen Reduktion verläuft. Dabei ist zu beachten, dass es mehrere Wege gibt, die sich hinsichtlich der Sanierungsraten, dem Anteil Erneuerbarer Energien bzw. dem Ausbau der Wärmenetze unterscheiden. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass auch die Umwandlungssektoren Strom und die Fernwärmebereitstellung im Jahr 2050 nur noch sehr geringe Emissionsfaktoren aufweisen.

**Einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung des Energiebedarfs haben Sanierungsraten und -tiefen.** Die Reduktion des Endenergiebedarfs wird vor allem durch thermische Gebäudesanierungen bewirkt.

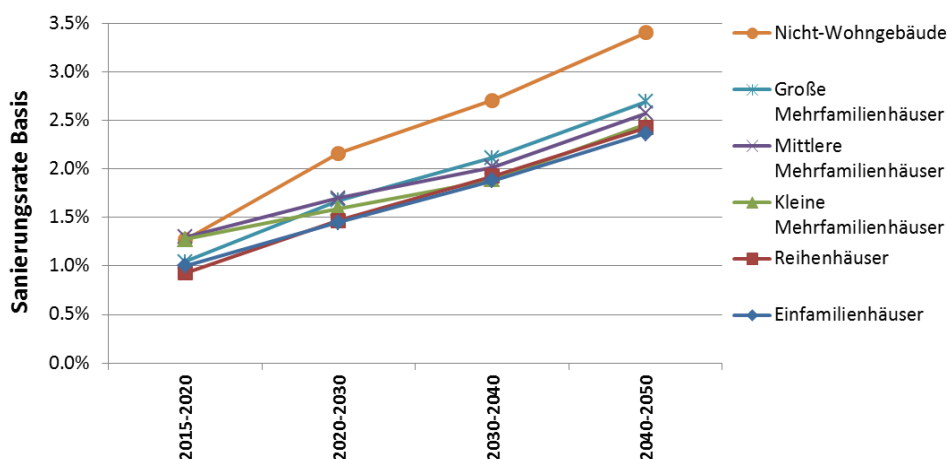


Abbildung 14: Entwicklung der modellierten Sanierungsraten zur Erreichung einer 80%igen CO<sub>2</sub>-Reduktion für unterschiedliche Gebäudekategorien

Die **thermische Sanierungsrate** steigt je nach Gebäudetyp von etwa 1 %-1,3 % in der Periode 2015-2020 auf etwa **2,5 % bis knapp 3,5 %** in der Periode 2040-2050. Dabei sind diese Werte als äquivalente Vollsanierungsraten zu verstehen (d.h. der Ersatz oder die Sanierung nur einer Gebäudekomponente wie z.B. von Fenstern wird nicht als volle Gebäudesanierung gewertet).

Dieser Anstieg der Sanierungsraten ist durch zwei Effekte zu erklären. Erstens steigt die „natürliche“ Sanierungsrate von Gebäuden aufgrund des Erreichens der technischen Lebensdauern, da die historischen Gebäude-Kohorten nicht gleichverteilt sind. Dies lässt generell einen Anstieg von Sanierungsaktivitäten erwarten. Zweitens erfolgt ein immer größerer Anteil dieser Sanierungen in einer thermisch umfassenden und ambitionierten Art und Weise, sodass der Anteil der thermisch effektiv wirksamen Vollsanierungen ansteigt. Dies ist einerseits durch politische Maßnahmen bedingt und andererseits aufgrund der im Szenario angenommenen steigenden Energiepreise<sup>26</sup>, der konsequenten Einhaltung bereits eingeführter Standards, der Technologieentwicklung und der Wirkung von Diffusionsprozessen bei Sanierungen.

**Neben der Sanierungsrate spielt auch die Sanierungstiefe bzw. -qualität eine wesentliche Rolle.** Im Basisszenario der Langfristszenarien wurde von einer Reduktion von 50 % bis 60 % des Heizwärmebedarfs nach einer Sanierung ausgegangen. Insgesamt ergibt sich im Gebäudebestand aus den Simulationen eine Reduktion des Nutzenergiebedarfs bis zum Jahr 2050 um 60 %.

**Die Wärmebereitstellung verschiebt sich stark von fossilen Energieträgern zu Erneuerbaren:** Während die Endenergieträger Kohle, Heizöl und Erdgas 2012 noch etwa 75 % des Endenergiebedarfs abdecken, geht dieser Wert auf etwa 30 % im Jahr 2050 zurück, wobei Kohle und Heizöl nur noch einen sehr geringen Anteil (etwa 4 %) einnehmen. **Eine starke Rolle nehmen Wärmepumpen ein**, mit einem Anstieg auf 60 TWh (2050) sowie Solarthermie mit einem Anstieg von 6,5 TWh (2012) auf 34 TWh (2050). Aufgrund des Rückgangs des Wärmebedarfs der Gebäude, die bereits jetzt mit Biomasse versorgt werden, bleibt der absolute Beitrag zur Wärmebereitstellung über den gesamten Zeitraum in etwa konstant. Unter Berücksichtigung anderer Sektoren stellt sich bereits bei einer 80%igen CO<sub>2</sub>-Reduktion die Frage nach einer effektiven gesamtwirtschaftlichen Allokation knapper Biomasse-Ressourcen, weshalb hier von keinen signifikanten Zuwächsen im

---

<sup>26</sup> Perspektivisch gehen die meisten Prognosen von steigenden Energiepreisen aus. Des Weiteren muss es langfristig gelingen, CO<sub>2</sub>-Preise auch im Wärmesektor wirken zu lassen, um den Transformationsdruck zu erhöhen.

Gebäudebereich ausgegangen wurde. Neben den in der folgenden Abbildung dargestellten dezentralen Biomasse-Heizsystemen kann Biomasse als Energieträger auch in Wärmenetzen eine wichtige Rolle einnehmen. **Mit 22 % am gesamten Endenergiebedarf stellen Wärmenetze bis 2050 in diesem Szenario eine bedeutende Größe in dem Sektor dar:** Im Vergleich zu 2012 würde sich deren Marktanteil bis zum Jahr 2050 mehr als verdoppeln.

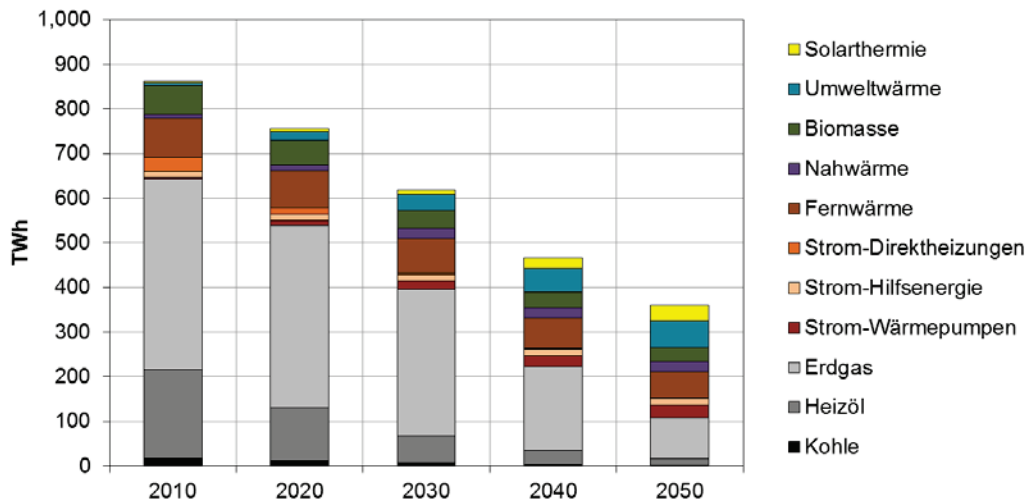


Abbildung 15: Modellierter Entwicklung des Endenergiebedarfs und der Anteile der Energieträger im Gebäudesektor im Basisszenario der Langfristszenarien

### 7.3 Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

Bis zum Jahr 2050 wird im oben beschriebenen Basisszenario eine Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs von ca. 80 % erzielt. **Dabei verbleibt ein nichtregenerativer, dezentraler Primärenergieeinsatz von 108 TWh, größtenteils Erdgas.** Daraus ergeben sich durch den Gebäudebestand direkt verursachte Emissionen von 23 Mt CO<sub>2</sub> im Jahr 2050. Zusätzlich bestehen Restemissionen aus der Fern- und Nahwärmenachfrage (81 TWh) und Stromerzeugung (Strom hauptsächlich für Wärmepumpen und Hilfsenergie). Wie oben dargestellt erfordert die Erreichung dieses Szenarios bereits sehr umfassende Maßnahmen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass diese derzeit auf breiten politischen Konsens treffen würden. Insbesondere ist hier auch das Wirtschaftlichkeits-

gebot des Energieeinsparungsgesetz (EnEG) zu beachten, an das die EnEV gebunden ist. Damit wird dem Ordnungsgeber untersagt, Anforderungen zu stellen, bei denen sich die zusätzlichen Investitionen nicht durch die zusätzlich zu erwartenden Energieeinsparungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauern amortisieren; im EEWärmeG besteht diese Bestimmung nicht. Es ist davon auszugehen, dass einige der für eine 95%ige Treibhausgasreduktion erforderlichen Maßnahmen bei den angewendeten Bewertungsverfahren und den üblicherweise getroffenen Annahmen dieses Wirtschaftlichkeitsgebot nicht erfüllen und damit aus rechtlicher Sicht nicht bindend wären. **Insofern sind die Herausforderungen zur Erreichung eines 95%-Szenarios, insbesondere auf der Ebene einer politischen, gesellschaftlichen Konsensfindung, nicht unbeträchtlich.**

Eine weitere Reduktion der Treibhausgase, um auf eine Reduktion von 95 % der Emissionen zu kommen, ist aus technischer Sicht möglich. Hierfür bedarf es im Gebäudesektor prinzipiell keiner neuen technologischen Entwicklungen. **Das heißt, die verfügbaren Technologien sind grundsätzlich vorhanden, müssen allerdings konsequent und in entsprechend hoher Qualität umgesetzt werden** (z.B. höhere Sanierungsraten und -tiefen, hohe Qualität in der konkreten handwerklichen Ausführung). Eine über die dargestellte Reduktion von 80 % hinausgehende zusätzliche CO<sub>2</sub>-Vermeidung hin zu einem 95%-Szenario stellt allerdings aus mehreren Gründen eine ungleich größere Herausforderung dar, was im Folgenden kurz dargestellt wird:

**Aufgrund der hohen Trägheiten im Heizsystembestand** (Lebensdauern der Heizungssysteme teilweise über 40 Jahre) **müssen frühzeitig ambitionierte Maßnahmen ergriffen werden.** Zusätzlich gibt es nur eingeschränkte bzw. relativ aufwändige Möglichkeiten zum Einsatz von EE-Wärme-Optionen im Geschosswohnungsbau. Hier ergeben sich Schwierigkeiten z.B. beim Umstieg von Gasetagenheizungen (die bei einer 80 % Reduktion noch „akzeptiert“ werden können) auf zentrale Wärmeverteilssysteme. Ein strenges regulatorisches Eingreifen kann hier zudem zu Akzeptanzproblemen führen.

**Kernfrage 6:** Umbruch im Kesselmarkt – Wie ist ein vollständiger Ausstieg aus fossilen Versorgungstechnologien bis zum Jahr 2025 zu schaffen?

**Sowohl die Sanierungsraten als auch die Sanierungstiefen müssten im Vergleich zu einer 80%igen Reduktion weiter erhöht werden.** Reduktionen des Heizwärmebedarfs um 70 % nach Sanierung sind aus technischer Sicht möglich und Sanierungsraten müssten früher als im 80%-Szenario auf 2,5 % bis 3 % angeho-



ben werden. Dazu müsste auch der Vollzug und die Qualität der Maßnahmen stärker überprüft werden („Compliance“). Auch hier sind teilweise große Akzeptanzprobleme zu erwarten. Im Bereich der unteren Einkommensschichten stellt sich sowohl bei Mietwohnungen (Mieterhöhungen nach thermischer Sanierung) als auch im Eigentum (hohe Investitionskosten) von Einfamilienhäusern die Frage der Finanzierung bzw. der Leistbarkeit von Maßnahmen, die eventuell regulatorisch vorgeschrieben werden.

**Kernfrage 7:** Wie können hohe Sanierungstiefen in Einklang mit verfassungsrechtlichen Bestimmungen und der Akzeptanz der Bevölkerung umgesetzt werden?

Auch der Umwandlungssektor (Strom, Fernwärme) müsste für eine 95%ige Reduktion vollständig dekarbonisiert sein, damit in einer primärenergetischen Betrachtung Emissionen durch den Einsatz effizienter Fernwärme und Wärmepumpen gesenkt werden können.

**Dabei ist zu beachten, dass die Wärmenachfrage oft nicht mit dem Dargebot erneuerbarer Energieträger korreliert (Solarenergie, Wind).** Hinzu kommt das Problem, dass dezentrale Wärmepumpen bei nicht gesteuertem Einsatz die Stromspitzenlasten erhöhen können, was zu Kapazitätsengpässen in der Strombereitstellung führen kann. Die Nachfragespitzen können aufgrund der relativ hohen Gleichzeitigkeit auch für die Auslegung von Verteilnetzen relevant sein. Eine gewisse Steuerbarkeit der Wärmepumpen erscheint bei solch hohen Anteilen und angestrebten Emissionsreduktionen fast unabdingbar. Aufgrund der möglichen Flexibilität in der Bereitstellung (Kombination aus KWK, Power-to-heat und Spitzenlastboilern) würden hier **Wärmenetze eine Möglichkeit zum Ausgleich von Wärme- und Stromnachfrage- sowie Angebotsspitzen darstellen.** Zusätzlich ergibt sich eine teilweise erforderliche Neu-Konzeptionierung von Wärmenetzen (Frage von Temperaturniveaus und Integration von Abwärme, Solarwärme, Umgebungswärme).

Welcher Anteil der Dekarbonisierung im Gebäudesektor durch dezentrale, v.a. gebäudeseitige Maßnahmen erreicht wird, und welcher Anteil durch eine entsprechend hohe Dekarbonisierung der eingesetzten Energieträger und insbesondere der leitungsgebundenen Energieträger Strom und Fernwärme, ist eine wesentliche offene Frage. Klar ist, dass beträchtliche Effizienzsteigerungen, die zu einer Reduktion des Wärmebedarfs um mehr als 50 % führen mit vertretbaren Maßnahmen möglich sind. Aufgrund der großen Herausforderungen bezüglich der Dekarbonisierung des Stromsektors und der begrenzt zur Verfügung stehenden Biomasse

ist es wahrscheinlich, dass **ein kostenoptimaler CO<sub>2</sub>-Vermeidungspfad über eine 50%ige Reduktion des Wärmebedarfs hinaus geht und in dem Bereich bis zu einer 70%igen Reduktion liegt**. Dies hängt allerdings sehr stark mit der Entwicklung der Gestehungskosten Erneuerbarer Energien sowohl im Stromsektor (z.B. dem technologischen Fortschritt bei Wind- und Solarenergie) als auch der Kosten erneuerbarer bzw. alternativer Wärmequellen ab.

Schon bei einer Reduktion der Emissionen um 80 % stellt sich die Frage nach einer möglichst effizienten Allokation der Biomasse auf die einzelnen Sektoren. Dies wird bei einer 95%igen Reduktion umso schwieriger, da Biomasse neben dem stofflichen Bedarf vor allem im Verkehr und der Industrie, aber auch in den Umwandlungssektoren verstärkt eingesetzt werden muss. **Es ist daher davon auszugehen, dass bei einer vollständigen Dekarbonisierung für den Gebäudesektor tendenziell eher weniger Biomasse zur Verfügung steht als in weniger ambitionierten Szenarien**. Dazu kommen potenzielle Flächennutzungskonflikte mit der Landwirtschaft. Hier bedarf es einer sektorübergreifenden Betrachtung der Potenziale, Einsatzmöglichkeiten und Alternativen.

**Kernfrage 8:** Wie viel Biomasse steht für Heizzwecke zur Verfügung und wie sieht der Strommix für den Betrieb von Wärmepumpen aus?

#### **7.4 Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95%-Welt**

Im Folgenden werden kurz einige Maßnahmen diskutiert, die zeitnah umgesetzt werden müssten, um die Option einer 95%igen Treibhausgasreduktion in 2050 zu erhalten.

**Kurzfristiger Handlungsbedarf ergibt sich im Gebäudesektor hauptsächlich aufgrund der Trägheit des Gebäude- und Heizungssystembestands.** So ist es durchaus möglich, dass Gebäude, die in den kommenden Jahren saniert werden, bis zum Jahr 2050 keine weiteren Eingriffe erfahren. Diese Problematik besteht, in etwas abgeschwächter Form, auch bei den Heizungssystemen. Auch wenn diese typischerweise technische Lebensdauern von 20-30 Jahren aufweisen, sind durchaus aktuell noch Systeme im Gebäudebestand vorhanden, die älter als 50 Jahre sind. Bei einer 95%igen Reduktion bleibt hier allerdings wenig Spielraum für Emissionen, die aus dem Restbestand aus weniger ambitioniert sanierten Gebäuden mit älteren Öl- und Gasheizungen resultieren, was in einem 80 % Szenario noch akzeptiert werden kann.

**Arbeitshypothese 6:** Die derzeitigen Verkaufszahlen von Heizkesseln weisen nicht auf eine Dekarbonisierung hin. Für eine 95 % Reduktion müssen die Marktanteile auch von fossilen Brennwertkesseln in den nächsten 10 Jahren auf 0 zurückgehen. Damit einher geht eine schrittweise Stilllegung/Rückbau der Gasnetze, falls diese nicht über erneuerbares Gas bzw. Wasserstoff gespeist werden.

**Bei einem sehr hohen Ambitionsniveau sollten finanzielle Förderungen somit nur noch für Maßnahmen vergeben werden, die mit dem Ziel einer 95%-igen Treibhausgasreduktion in 2050 kompatibel sind.** Auch die Förderungen von öl- und gasbefeuerten Brennwertkesseln sind mit einer 95%igen Reduktion nicht vereinbar. Dies würde auch für kleine KWK-Anlagen in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie im Gewerbebereich gelten. Zwar ist deren Durchdringung heute noch eher gering. Bei den heutigen Kosten- und Förderbedingungen erscheinen diese Anlagen aus einzelwirtschaftlicher Sicht aber durchaus als relevanter Option für die Zukunft. In letzter Konsequenz stellt sich auch die Frage nach der Notwendigkeit der Gasnetzinfrastuktur, sollten nicht verstärkt alternative gasförmige Energieträger zum Einsatz kommen (siehe Abschnitt 2.5.3). Ein Gasnetzausbau steht jedenfalls mit hoher Wahrscheinlichkeit im Konflikt mit einer 95%igen Reduktion bis 2050.

**Bereits heute sollten Maßnahmen ergriffen werden, um Sanierungsraten auf über 2,5 % bis zum Jahr 2020-2025 anzuheben, und Sanierungstiefen,** die eine Reduktion des Heizwärmebedarfs um etwa 70 % zur Folge haben, angestrebt werden. Die Vorgaben für die Effizienz des Gebäudebestandes zur Erreichung einer 95%igen Reduktion hängen selbstverständlich stark mit dem Anteil erneuerbarer Wärmebereitstellung zusammen.

**Arbeitshypothese 7:** Für eine 95 % Reduktion bedarf es einer stärkeren Reduktion des durchschnittlichen spezifischen Wärmebedarfs (bis zu 70 %) der Gebäude. Während hohe Gebäudestandards im Neubau üblicherweise gut umsetzbar sind, ist bei Sanierungen mit teilweise großen Widerständen der Gebäudeeigentümer zu rechnen. Regelungen zu sehr ambitionierten Sanierungstiefen könnten am Widerstand der Wohnungs- und Hauseigentümer scheitern.

Letztendlich stellt eine derartige Reduktion der Emissionen bis 2050 eine große Herausforderung dar. Begleitende nichtökonomische Maßnahmen wie **Informations- und Beratungsprogramme** werden hier eine zentrale Rolle spielen, um die Akzeptanz für die notwendigerweise sehr starken Eingriffe schaffen zu können.

### **Beispielmaßnahmen:**

#### **Höhere Sanierungsraten und -tiefen, EE-Wärmeverpflichtung**

Im Basisszenario der Langfristszenarien wird eine Reduktion des Heizwärmebedarfs von 50 % bis 60 % nach Sanierung erreicht. **Für die Erreichung einer 95%igen Reduktion sind höhere Sanierungstiefen erforderlich.** Denkbar wären Reduktionen des Heizwärmebedarfs um bis zu 70 % im Vergleich zum Ausgangszustand. Erreicht werden kann dies durch eine Verschärfung der Gebäudestandards und strengen Verpflichtungen zur thermischen Sanierung, um Sanierungsraten von 2,5 % bis 3 % bereits im Zeitraum zwischen 2020 bis 2030 zu erzielen. Die größten Herausforderungen liegen hier zum einen in der **rechtlichen Ausgestaltung** (und der Sanktionierungsmechanismen bei Nichteinhaltung) besonders im Bereich der Bestandssanierung; andererseits auch ist zu bedenken, dass sehr ambitionierte Vorgaben nicht bei allen Akteursgruppen auf **Akzeptanz** stoßen werden und sich die bereits bestehenden rechtlichen Probleme aufgrund möglicher Eingriffe in Eigentumsrechte verschärfen werden.

Unabhängig von Sanierungsraten und -tiefen ist ein **Umstieg auf erneuerbare Heizungstechnologien notwendig.** Dabei ist zu bedenken, dass aufgrund der langen Lebensdauern von 15 bis 30 Jahren und der aktuell hohen Anteile fossiler Heizkessel am Heizungsmarkt noch immer beträchtliche Anteile an fossilen Heizungssystemen im Gebäudebestand des Jahres 2050 zu finden sein werden. Für eine 95%ige Treibhausgasemission ist daher ein **rascher, vollständiger Umstieg auf erneuerbare Wärme bzw. Wärmenetze notwendig.** Aus bisherigen Analysen ergibt sich die Notwendigkeit der Einführung einer **flächendeckenden EE-Wärmeverpflichtung im Neubau und bei Heizkesseltausch** bereits ab dem Jahr 2020. Dies erscheint angesichts der derzeitigen Marktanteile im Kesselmarkt, in dem gasbefeuerte Anlagen mehr als 70 % der Verkaufszahlen im Jahr 2015 einnehmen ebenfalls als sehr ambitionierte Maßnahme. Auch hier ergeben sich rechtliche Fragen sowohl auf Seiten der Konsumenten, die zu teilweise teureren Optionen verpflichtet werden, als auch auf Seiten der Heizungsindustrie, in der dadurch ganze Technologiefelder wegfallen würden und durch erneuerbare Alternativen ersetzt werden müssten.

## 8 Nichtenergetische Emissionen

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die energetischen Emissionen diskutiert sowie für den Industriesektor auch die Prozessemissionen. Nichtenergetische Klimagasemissionen oder -senken umfassen im Wesentlichen die Bereiche

- Landwirtschaft,
- Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft,
- Industrieprozesse und
- Abfallwirtschaft.

Die **Abfallwirtschaft** leistet derzeit mit etwas weniger als 1 % nur einen geringen Beitrag zur Gesamtemission an Treibhausgasen. Gegenüber dem Jahr 1990 wurde bis heute bereits eine 90%ige Minderung erzielt, sodass weitere Minderungspotenziale nur sehr marginal ausfallen. Eine vertiefte Betrachtung dieses Sektors ist im Hinblick auf die Herausforderungen einer 95%igen Treibhausgasreduktion verzichtbar.

**Von großer Bedeutung sind jedoch die Emissionen aus Landwirtschaft und Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft.** Diese werden im Folgenden in ihrer Bedeutung und Reduktionsoptionen dargestellt. Industrieprozesse hingegen wurden bereits im Abschnitt 6 zum Industriesektor mitdiskutiert. Insgesamt ist anzumerken, dass die Möglichkeiten zur Reduktion der nichtenergetischen Emissionen bisher in weniger Studien behandelt werden, als dies für die energetischen Emissionen der Fall ist. Die Analysen in diesem Papier stützen sich in weiten Teilen auf die Arbeiten im Projekt Klimaschutzszenario; diese sind zum einen mit einer über die Themenfelder konsistenten Methodik durchgeführt, zum anderen wird sowohl ein 80%-Reduktionpfad (das Szenario KS 80) als auch eine 95%ige Reduktion (das Szenario KS 95) der Treibhausgase untersucht.

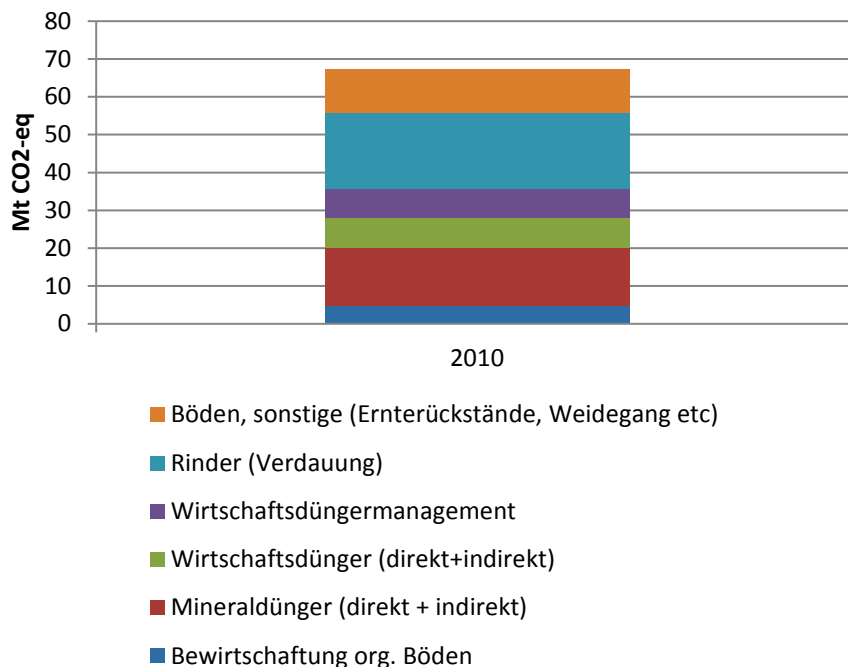
## 8.1 Landwirtschaft

### 8.1.1 Status quo

Im Jahr 2010 betrug die Emissionen aus der Landwirtschaft 68 Mt CO<sub>2</sub>-eq. Für sich genommen überschreiten die landwirtschaftlichen Emissionen bereits das Emissionsbudget einer 95%igen Reduktion von 63 Mt CO<sub>2</sub>-eq. Emissionen entstehen im Wesentlichen in:

- Tierhaltung: verdauungsbedingte Methanemissionen von Wiederkäuern
- Lagerung von Wirtschaftsdünger: Methan- und Lachgasemissionen
- Lachgas-Bodenemissionen aus:
  - der Düngung,
  - der Umsetzung von Ernterückständen,
  - gasförmigen Stickstoff-Verlusten sowie -Austrägen ins Grund- und Oberflächenwasser,
- der Bewirtschaftung organischer Böden.

Die Beiträge der einzelnen Komponenten sind in Abbildung 17 dargestellt. Die größten Treibhausgasquellen in der deutschen Landwirtschaft sind die Rinderhaltung und der Düngemiteinsatz.



Quelle: eigene Berechnungen (IFEU) nach Daten des Nationalen Inventarberichtes 2012

Abbildung 16: Treibhausgasquellen in der Landwirtschaft im Jahr 2010 (Vorläufige Berechnung)

## 8.1.2 Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

Da im Basisszenario der Langfristszenarien neben den Industrieprozessemissionen keine Modellierung der nichtenergetischen Emissionen durchgeführt wurde, baut das Szenario bei den nicht-energetischen Emissionen stark auf dem Szenario KS 80 aus dem Projekt „Klimaschutzszenario 2050“ auf (siehe: [Repenning et al. 2015]).<sup>27</sup> Aufgrund der in diesem Projekt durchgeführten umfangreichen und in sich geschlossenen Modellierung der nichtenergetischen Emissionen beziehen sich die folgenden Ausführungen auf die beiden Szenarien KS80 und KS95 dieses Projekts.

Im Szenario KS 80 wird eine Emissionsreduktion der Landwirtschaft auf 51 Mt erreicht. Dies entspricht einer Emissionsreduktion von 42 % im Vergleich zu 1990.

Folgende Maßnahmen wurden im KS 80 umgesetzt:

- **Der Einsatz von Stickstoffdünger wird reduziert**, indem zum einen Stickstoffüberschüsse von ca. 100 kg im Jahr 2010 auf 50 kg im Jahr 2050 gesenkt werden und zum anderen, indem der Ökolandbau von 6 % auf 20 % ausgeweitet wird.
- **Acker- und Grünland auf organischen Böden werden rückvernässt**. Von derzeit 1,2 Millionen Hektar bewirtschafteten Moorböden bleiben nur noch 0,9 Millionen Hektar in Produktion.
- Die **Güllevergärung** wird von ca. 20 % im Jahr 2010 auf 50 % im Jahr 2050 gesteigert.

Die Senkung der Emissionen ist allerdings allein durch die genannten technischen Maßnahmen nicht zu erreichen, sondern muss durch eine **Veränderung der Ernährungsgewohnheiten** ergänzt werden. Im 80 % Szenario bedeutet dies eine deutliche **Reduktion der Rinderbestände** auf etwa die Hälfte des Bestandes von 2010 sowie eine **Reduktion der Schweinebestände**. Dies entspräche einer **Reduktion des Fleischkonsums** pro Person von 760 g/Woche pro Person auf 450 g/Woche. Hierbei ist anzumerken, dass eine Reduktion des Fleischkonsums nicht automatisch zu einer Senkung der Tierzahlen führt. Eine Erhöhung des Exportanteils könnte ebenfalls eine Folge sein.

---

<sup>27</sup> Bei den Suffizienzmaßnahmen in der Ernährung (niedrigerer Fleischkonsum) ist das Basisszenario etwas weniger ambitioniert als das Szenario KS 80.

### 8.1.3 Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

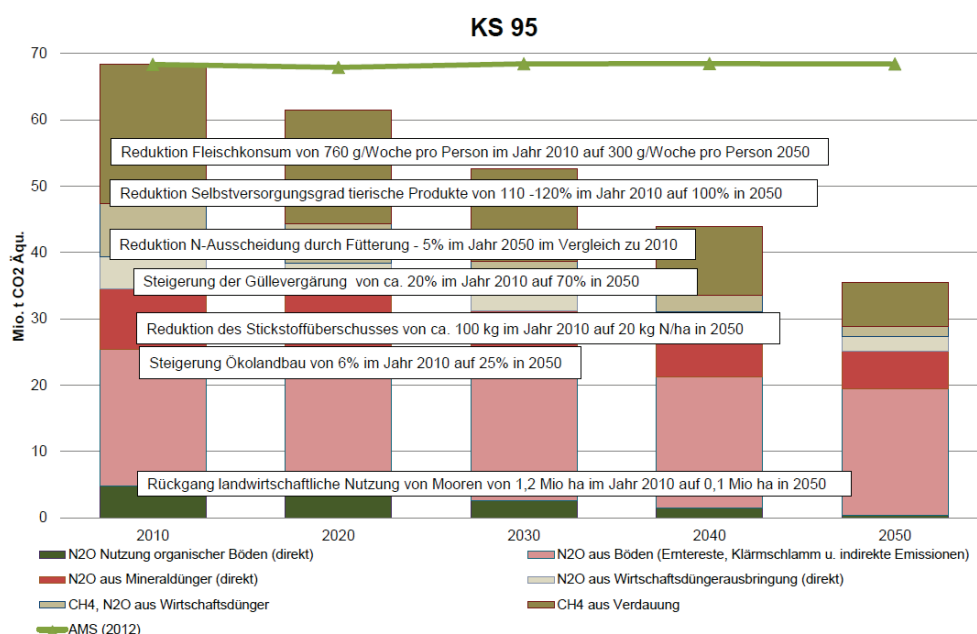
Charakteristisch für den Sektor Landwirtschaft ist, dass der Großteil der Emissionen aus Methan- und Lachgasemissionen durch biologische Prozesse entsteht. Eine vollständige Emissionsreduktion wie in einigen anderen Sektoren ist daher nicht möglich.

**Um eine 95 %ige Reduktion im Gesamtszenario zu erreichen, wird in bestehenden Szenarien ein Zielwert von 35 Mt CO<sub>2</sub>-eq für notwendig erachtet** [Repenning et al. 2015; UBA 2014]. Damit ist die Landwirtschaft der größte Emittent im 95%-Szenario und würde etwa die Hälfte der Gesamtemissionen 2050 verursachen. Eine solche Senkung würde keine anderen Maßnahmen im Vergleich zum 80%-Szenario erfordern, die Umsetzungstiefe wäre jedoch deutlich ambitionierter. Abbildung 18 verdeutlicht die Umsetzungstiefe der Maßnahmen, die zur Erreichung des 95 % Ziels im KS 95 umgesetzt wurden.

Als wichtigste Maßnahmen sind die **Reduktion des Düngemittleinsatzes** und eine **starke Reduktion der Rindfleischproduktion** auf etwa ein Drittel der Tierbestände zu nennen. Die Reduktion des Düngemittleinsatzes wird durch die Ausweitung des Biolandbaus von 5 % im Jahr 2010 auf 25 % im Jahr 2050 erreicht sowie durch den Abbau der Düngemittel-Überschüsse von 100 kg/ha im Jahr 2010 auf 20 kg/ha im Jahr 2050. Weitere Beiträge zur Reduktion werden durch eine **Steigerung der Güllevergärung** sowie die **Rückvernässung** von landwirtschaftlich genutzten Mooren geleistet. Von 1,2 Millionen Hektar landwirtschaftlich genutzter Moore im Jahr 2010 bleiben im Jahr 2050 0,1 Millionen Hektar in Produktion.

Eine Senkung der Emissionen von 68 Mt CO<sub>2</sub> im Jahr 2010 auf einen Zielwert von 35 Mt 2050 ist ohne eine Reduktion der Tierzahlen nicht möglich. Abbildung 18 zeigt, dass durch die Umsetzung der technischen Maßnahmen rund 19 Mt CO<sub>2</sub> eingespart werden, die restlichen 14 Mt CO<sub>2</sub> Einsparung tragen zu Einschränkungen in der Tierproduktion bei.





Quelle: [Repenning et al. 2015]

Abbildung 17: Emissionsreduktion und Annahmen im Sektor Landwirtschaft im 95%-Szenario des Klimaschutzszenario 2050

Eine bisher nicht in den Szenarien berücksichtigte Einsparmöglichkeit könnte der Einsatz von **Nitrifizierungsinhibitoren** sein. Diese verringern bei der Düngung die Bildung von N<sub>2</sub>O-Emissionen. Eine Einsparung von etwa 35 % wird als realistisch angesehen [Ruser und Schulz 2015]. Bei einem flächendeckenden Einsatz von Nitrifizierungsinhibitoren ließen sich bei einem Düngemittleinsatz wie 2010 ca. 3,5 Mt CO<sub>2</sub>-Einsparung realisieren (Quelle: IFEU eigene Berechnung). Böden, Klima und landwirtschaftliches Management wirken sich auf die Wirksamkeit der Nitrifizierungsinhibitoren aus. Bei einer Berücksichtigung dieser Maßnahme im 95 % Szenario wäre die Anwendbarkeit und tatsächliche Einsparung unter den hiesigen Bedingungen zu prüfen.

#### 8.1.4 Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95%-Welt

Für jede der oben genannten Treibhausgasquellen **wären zeitnah Schritte zur Minderung** einzuleiten. Im Folgenden werden mögliche Maßnahmen für die Bereiche Düngemittleinsatz und Rindfleischproduktion beispielhaft erläutert:

Mineral- und Wirtschaftsdüngereinsatz: Der **Flächenbilanzüberschuss** (d.h. die Differenz zwischen Stickstoffzufuhr und -abfuhr der Fläche) in Deutschland beträgt im Mittel 111 kg/ha und ist damit **einer der höchsten Europas**. Entsprechend

groß ist das Einsparpotenzial. Eine „nationale Stickstoffstrategie“ soll sich mit dem Thema befassen. Maßnahmen, die vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) vorgeschlagen werden, umfassen beispielsweise die Einführung einer Stickstoffüberschussabgabe und strengere Kontrollen und Sanktionen bei der Umsetzung der Düngemittelverordnung [SRU 2015]. Die Erstellung und Umsetzung dieser Strategie ist maßgeblich für die Realisierung des Einsparpotenzials. Eine weitere Strategie zur Verringerung des Düngemiteleinsatzes ist die **Ausweitung des Biolandbaus**. Auch dies ist kein Selbstläufer, sondern wird Steuerung seitens der Politik erfordern.

Beim Rindfleischkonsum zeigen sich gegenläufige, überlagernde Trends. Geeignete Maßnahmen zur Verstärkung der zielführenden Trends können hier zur Erschließung des Einsparpotenzials beitragen. Nach einer starken Abnahme der Tierzahlen in den 1990ern durch Aufgabe von Rinderhaltungen in Ostdeutschland und einem Knick in der Produktion durch BSE in den 2000ern sind die Tierzahlen von 2010 bis 2015 relativ stabil (-1,2 % Rinder) mit einer leichten Zunahme bei den Milchkühen (+2,5 %) [destatis 2015b]. Die Tendenz im Pro-Kopf-Rindfleischkonsum ist seit 2001 leicht steigend. Demgegenüber steht, dass Anzahl und Absatz vegetarischer und veganer Produkte in Supermärkten stark ansteigen und große Fleischkonzerne neue Produktparten mit veganen/vegetarischen Produkten erschließen.

In einer 95-%-Welt ließe sich eine Reduktion der Emissionen auf verschiedene Weise umsetzen. Im Szenario KS 95 wurde angenommen, dass der Verbraucher den Fleischkonsum von derzeit 760 g/Woche auf 300 g/Woche vermindert [Repenning et al. 2015]. Hier sind jedoch auch andere Szenarien denkbar, beispielsweise die **Umstellung des Fleischverzehr von Rind auf Geflügel**. Auch die **Umstellung auf pflanzliche Proteinquellen** (Hülsenfrüchte etc.) könnten einen Teil des Lösungsraums in einer 95-%-Welt darstellen.

## **8.2 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)**

### **8.2.1 Status quo**

Der Bereich LULUCF ist dadurch charakterisiert, dass er **sowohl Quelle als auch Senke** für Treibhausgasemissionen sein kann. In bisherigen Szenarien wird dieser Sektor oftmals nicht bei der Berechnung berücksichtigt, da er in den Kyotogasen nicht mit erfasst wird. Der Umgang mit diesem Sektor (u.a. also ob er bei der Zielerreichung mit berücksichtigt wird) wird sich erheblich auf die Erreichung des

95%-Ziels auswirken. Als CO<sub>2</sub>-Senke kann er zur Zielerreichung beitragen, wenn die Senkenfunktion durch geeignete Maßnahmen umgesetzt wird.

Im Sektor LULUCF wurden im Jahr 2010 rund 42 Mt CO<sub>2</sub> (inklusive Methan und Lachgas) emittiert (siehe Abbildung 17). Die **größten Treibhausgasquellen** in Deutschland sind **Acker- und Grünland auf organischen Böden**. Sie sind für rund 80 % der Emissionen in diesem Sektor verantwortlich [Repenning et al. 2015]. Torfabbau und Umbruch von Grünland tragen ebenfalls, aber in geringerem Umfang zu den Emissionen bei. Demgegenüber fungiert der Wald als Treibhausgas-senke (siehe Abbildung 17).

### 8.2.2 Möglicher Zustand im Falle einer 80%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

Im Folgenden wird auf Modellergebnisse des Szenarios KS 80 des Berichtes „Klimaschutzszenario 2050, 2. Modellierungsrunde“ zurückgegriffen [Repenning et al. 2015].<sup>28</sup> Zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im LULUCF Sektor werden folgende Maßnahmen umgesetzt (Abbildung 19):

- 30 % Acker- und Grünland auf Moorböden wird in Feuchtgebiete (**Wiedervernässung**) z.T. auch in Wald und Gehölze umgewandelt. Andere Flächen auf organischen Böden werden nicht mehr in Acker- oder Grünland umgewandelt.
- Ein **Grünlandumbruchsverbot** zu 30 % wird umgesetzt.
- Der **Torfabbau wird eingestellt**.
- Die **Senkenfunktion des Waldes** wird erhalten.

### 8.2.3 Herausforderungen im Falle einer 95%igen Treibhausgasreduktion Deutschlands

Im Szenario KS 95 wird von den gleichen Maßnahmen ausgegangen, der Umsetzungsgrad der beiden ersten oben genannten Maßnahmen (Wiedervernässung und Grünlandumbruchsverbot) wird jedoch von 30 % auf 95 % erhöht. Der größte Beitrag zur Minderung der Emissionen besteht auch in diesem Szenario in der Rückvernässung von landwirtschaftlich genutzten organischen Böden. Da Acker- und Grünland auf organischen Böden nur etwa 6 % der landwirtschaftlichen Fläche

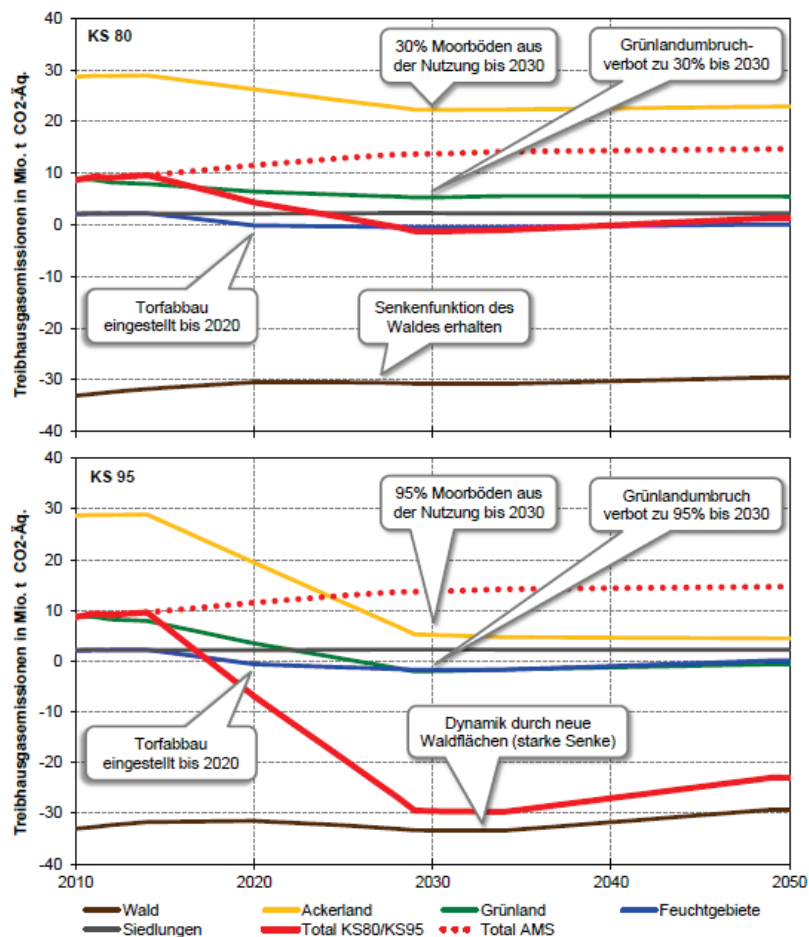
---

<sup>28</sup> Da im Basisszenario der Langfristszenarien neben den Industrieprozessemissionen keine Modellierung der nichtenergetischen Emissionen durchgeführt wurde, baut das Szenario bei den nichtenergetischen Emissionen stark auf dem Szenario KS 80 auf. Bei den Suffizienzmaßnahmen in der Ernährung (niedrigerer Fleischkonsum) ist das Basisszenario weniger ambitioniert als das Szenario KS 80.

ausmachen, kann hier durch Konzentration von Maßnahmen auf eine relativ kleine Fläche eine große Einsparung erzielt werden. Der hohe Umsetzungsgrad dieser Maßnahme bringt jedoch Herausforderungen mit sich. Ein Großteil der relevanten Flächen befindet sich beispielsweise in Norddeutschland, so dass für einzelne Regionen stärkere raumplanerische Umstrukturierungen erforderlich werden. Neben Rückvernässungskosten können auch Kosten für Entschädigungen auftreten.

### 8.2.4 Heute notwendige Schritte für die Erhaltung der Option einer 95%-Welt

Für jede der oben genannten Minderungsmaßnahmen wären Schritte einzuleiten. Insbesondere Schritte zur Umwandlung von Ackerland und Grünland auf organischen Böden zu Feuchtgebieten, Gehölzen oder Wald sind nötig, da hier das größte Einsparpotential erschlossen werden kann.



Quelle: [Repenning et al. 2015]

Abbildung 18: Treibhausgasemissionen und -einbindung im LULUCF-Sektor im KS80 und KS95

## 9 Zentrale Schlussfolgerung

Die nachfolgenden Erkenntnisse sind Ergebnis grundsätzlicher Überlegungen zu möglichen Optionen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 %. Sie gelten unabhängig vom Zeitpunkt der Zielerreichung.

1. **Eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % geht deutlich über eine Beschleunigung eines 80%igen Transformationspfades hinaus und bedeutet eine vollständige Ausschöpfung der technisch verfügbaren Reduktionspotentiale.** Die quasi-unvermeidbaren Emissionen aus den Bereichen Landwirtschaft und Industrie füllen bereits nahezu das gesamte verbleibende Emissionsbudget
2. **Alle Sektoren müssen ein Höchstmaß an Dekarbonisierung erreichen.** Aufgrund der sehr niedrigen Emissionsbudgets sind nur noch sehr geringe Verschiebungen zwischen Sektoren möglich.
  - a. **Investitionen in langlebige Infrastrukturen müssen bereits heute zukünftige CO<sub>2</sub>-Neutralität berücksichtigen.** Dies gilt z.B. für Gebäude, Industrie und Kraftwerke.
  - b. **Ohne deutliche Verhaltensänderungen ist das Ziel kaum zu erreichen.** So können z.B. in der Landwirtschaft ohne eine Reduktion und Veränderung von Fleischproduktion und -konsum die Emissionen nicht auf das nötige Niveau gesenkt werden. Das Potential dieser und anderer sogenannter Suffizienzmaßnahmen kann grundsätzlich erheblich sein. Ihre Bewertung ist allerdings herausfordernd und betrifft angesichts der zum Teil damit verbundenen hohen Eingriffstiefe in die individuelle Lebensgestaltung auch die gesellschaftspolitische Debatte.
3. **Nachhaltig produzierte Biomasse ist eine knappe Brennstoffressource. Dem Energiesystem steht nur eine begrenzte Menge an Biomasse zu Verfügung.** Ihr Einsatz muss sich deshalb auf ausgewählte „Problembereiche“ wie z.B. den Luftverkehr beschränken.
4. **Ein CO<sub>2</sub>-neutraler Stromsektor als Basis für die Bereitstellung von Strom und Wärme bildet das Rückgrat der Energieversorgung.** Erneuerbare Energien müssen in Deutschland und Europa stark ausgebaut werden.
  - a. Transportmittel werden soweit wie möglich mit Strom angetrieben.
  - b. CO<sub>2</sub>-neutraler Strom und direkte Nutzung Erneuerbare Energien decken weitgehend den Wärmebedarf.

5. **Die zentrale Motivation für einen effizienten Umgang mit Energie ist die Reduktion von Akzeptanzfragen beim Ausbau der Erzeugungs- und Netzinfrastrukturen für Strom.** Wind und Photovoltaik dominieren die Stromerzeugung. Die hierfür in den Langfristszenarien unterstellten Potentiale in Deutschland liegen in der Größenordnung von 1.000 TWh bei Kosten von maximal 11 cent/kWh. In Europa sind die Potentiale insgesamt sogar noch deutlich größer und z.T. auch günstiger.
6. **Der Gebäudesektor muss seinen Energiebedarf durch schnelle und tiefgehende Sanierungen sehr stark reduzieren.** Dies ist notwendig, um eine effiziente Versorgung durch Erneuerbare Energien und Stromtechnologien zu ermöglichen.
7. **Der Industriesektor steht vor einem grundlegenden Wandel.** Die Umstellung der industriellen Produktion erfordert in vielen Bereichen neue Technologien, Prozesse und andere Stoffnutzungskonzepte. Hier sind erhebliche Anstrengungen in den Bereichen F&E sowie Transformationsanreize und Regulierung notwendig.
8. **CCS ist eine Schlüsseltechnologie für die Industrie.** CCS kann eine wichtige Option sein, um Prozessemissionen in der Industrie und ggf. Emissionen bei der Bereitstellung der Fernwärme zu reduzieren. Ohne CCS steigt der Innovationsdruck für den Industriesektor deutlich an.
9. **Für eine 95%-Reduktion der Treibhausgasemissionen ist ein gemeinsames europäisches, letztlich weltweites Vorgehen zwingend notwendig;** ohne dieses kann *Carbon Leakage* durch Verlagerung von Strom- und Industrieproduktion ins Ausland kaum verhindert werden, wodurch die Klimawirkung von Maßnahmen gemindert oder negiert wird.
10. **Negative Emissionen durch Biomasse-CCS können nur einen begrenzten Beitrag leisten.** Biomasse-CCS kann zwar bereits bei CO<sub>2</sub>-Preisen unter 100 Euro/t attraktiv werden; da aber nur wenig Biomasse für zentrale Anwendungen zur Verfügung steht, ist das Einsparpotential begrenzt. Auch der Beitrag anderer „künstlicher“ CO<sub>2</sub>-Senken sollten aus heutiger Sicht als begrenzt angesehen werden. Das Wissen über diese Technologien ist derzeit zu gering, um sie angemessen als Alternativen bewerten und berücksichtigen zu können. Daher sollten sich Aktivitäten in diesem Bereich zunächst weiter auf eine vertiefte Forschung konzentrieren.
11. **Die ökonomischen Wirkungen eines 95%-Szenarios sind nur schwer abzusehen.** Einige Technologien, die aus heutiger Sicht für das Erreichen eines 95%-Ziels erforderlich wären, befinden sich zumeist erst im Forschungsstadium. Mehrkosten z. B. im Vergleich zu einem 80%-Szenario sind daher

kaum zu beziffern. Noch schwieriger zu bewerten sind die gesamtwirtschaftlichen Folgen, z. B. die Wirkungen von Strukturänderungen. Eine ökonomische Bewertung muss zudem die Konsequenzen einer Zielverfehlung oder Änderungen der (internationalen) Rahmenbedingungen berücksichtigen, die dazu führen könnten, dass man von einem einmal eingeschlagenen 95%-Pfad wieder abweicht.

**Akzeptanz ist die zentrale „Währung“ des Transformationsprozesses.** Insgesamt zeigt sich, dass in allen Sektoren Herausforderungen entstehen, die aus heutiger Sicht unpopuläre Maßnahmen und/oder zusätzliche Ausgaben erfordern. Dies gilt z.B. für den Ausbau der Infrastrukturen im Stromsektor, Veränderung des Landschaftsbilds, die Gebäudesanierung oder Änderungen der Ernährungsgewohnheiten. Die Sicherung der nötigen gesellschaftlichen Akzeptanz ist die zentrale Klammer, die den Energiewendeprozess zusammenhält.

## 10 Notwendige Maßnahmen

Nachfolgend werden Maßnahmen aufgeführt, die aus heutiger Sicht erforderlich wären, sofern die Option einer 95%igen Dekarbonisierung bis 2050 offengehalten werden soll. Für eine spätere Erreichung dieses Ziels, z.B. in 2060, gelten jedoch grundsätzlich die gleichen Bedingungen. Die notwendigen Maßnahmen würden dadurch teilweise zeitlich entzerrt, die mit den erforderlichen Schritten verbundene und zum Teil erhebliche Eingriffstiefe würde sich aber nicht verändern.

Die dargelegten Schritte sind nicht als konkrete Empfehlungen zu verstehen, sondern sollten in einer „Wenn-dann“-Logik interpretiert werden: Wenn man sich dafür entscheidet, mit den aus heutiger Sicht realistisch verfügbaren Technologien die Option für eine 95%ige Dekarbonisierung bis etwa zur Jahrhundertmitte offenzuhalten, dann wären dazu bestimmte Schritte erforderlich. Diese Erfordernisse entstehen insbesondere, um angesichts langlebiger Infrastrukturen Lock-In Effekte oder zumindest erhebliche *stranded investments* und damit einhergehende Opportunitätskosten zu vermeiden. Andersherum gilt aber auch: Ergreift man heute ausschließlich mit Blick auf die Erhaltung der 95%-Option bestimmte Maßnahmen und verzichtet im Weiteren darauf, den 95%-Pfad weiterzuverfolgen, so können sich auch diese Maßnahmen als volkswirtschaftlich ineffizient erweisen.

1. **Maßnahmen zur deutlichen Erhöhung und Stärkung des europaweiten CO<sub>2</sub>-Preissignals.** Eine vollständige Dekarbonisierung ist ohne eine glaubwürdige, dauerhafte und ambitionierte Stärkung des europaweiten CO<sub>2</sub>-Preissignals nicht möglich. Hierzu wäre ein CO<sub>2</sub>-Preis von (ggf. deutlich) über 50 EUR/t CO<sub>2</sub> bereits in 2030 vermutlich unerlässlich, um die 95%-Option erreichbar zu halten.
2. **Beschleunigung des Ausbaus Erneuerbarer Energien.** Für die stärkere Elektrifizierung ist ein schnellerer Ausbau der Erneuerbaren Energien unumgänglich; der Ausbaukorridor müsste in der Folge angepasst werden.
3. **Zeitnahe Entscheidung über die Rolle von CCS ist notwendig.** Fiele diese Entscheidung positiv aus, sollte die Technologie zeitnah stark gefördert werden. Andernfalls sollte der Entwicklung alternativer Lösungen für bestimmte Bereiche wie Fernwärme und Prozessemissionen hohe Priorität eingeräumt werden.
4. **Ausstieg aus PKW mit Verbrennungsmotoren auf Basis fossiler Brennstoffe.** Zur Erreichung des 95%-Ziels dürften spätestens 15 Jahre vor angestrebter Zielerreichung, also z.B. ab 2035, keine PKW mehr mit Verbrennungsmotor verkauft werden, sofern der Kraftstoff nicht CO<sub>2</sub>-neutral bereitge-



stellt werden kann. Zumindest aus heutiger Sicht erscheint die Möglichkeit einer ausreichenden und ökonomisch effizienten Bereitstellung sowohl durch Biokraftstoffe als auch durch strombasierte Kraftstoffe wenig plausibel.

5. **Schnelle und tiefe Sanierung der Gebäude.** Im Gebäudesektor wäre eine Steigerung der energetischen Sanierungsraten (und –tiefen) deutlich über das bisherige Ziel von 2 % notwendig. Förderungen dürften nur noch für Maßnahmen gewährt werden, die mit der vollständigen Dekarbonisierung vereinbar sind, d.h. keine weitere Förderung von Öl- oder Gasheizungen.
6. **Ausbau und Verdichtung der Wärmenetze.** Wärmenetze erleichtern den Brennstoffwechsel in der Wärmeversorgung. Entsprechende Förderung zum Erhalt, Ausbau und der Verdichtung von Wärmenetzen sind deshalb ein wichtiger Baustein der Wärmewende. Dieser Aspekt gilt in einem möglichen 95%-Pfad in besonderem Maße.
7. **Stärkung der Transformationsanreize im Industriesektor.** Im Industriesektor müsste aufgrund langer Anlagenlebensdauern der CO<sub>2</sub>-Preis zeitnah durch weitere Maßnahmen unterstützt werden. Auch für Unternehmen außerhalb des ETS wären starke Transformationsanreize notwendig. Dabei müssten auch Mittel gefunden werden um die Gefahr bzw. Auswirkungen von Carbon Leakage zu minimieren.
8. **Steigerung der Materialeffizienz.** Maßnahmen zur Forcierung der Materialeffizienz und der Substitution CO<sub>2</sub>-intensiver Materialien (z.B. Zement) kommt für den 95%-Pfad eine besondere Bedeutung zu.
9. **Verstärkte Forschung zu Schlüsseltechnologien.** Für bestimmte Schlüsseltechnologien müssten die Anstrengungen in Forschung und Entwicklung schnell erhöht werden:
  - a. **Nahezu unverzichtbare Technologien:** Bestimmte Technologien, die für einen 80%igen Reduktionspfad (zumindest unter bestimmten Voraussetzungen) als optional anzusehen sind, sind für einen 95%-Pfad nahezu unabdingbar, wie z.B.
    - Biokraftstoffe, insbesondere Biokerosin der zweiten und dritten Generation
    - Strombasierte Lösungen im Schwerlastverkehr, wie z. B. Oberleitungs-LKW
    - CO<sub>2</sub>-arme Prozesse zur Herstellung von Zementtypen und Stahl
  - b. **Technologien mit wichtigem Potential.** Andere Technologien haben bei entsprechenden Entwicklungen Potential zu einem wichtigen Beitrag. Dazu zählen z.B.:
    - Künstliche CO<sub>2</sub>-Senken, insbesondere Biomasse CCS

- Kohlendioxid-Abscheidung aus der Luft
- Strombasierte Kohlenwasserstoffe. Sollten die Kosten der Kohlendioxid-Abscheidung sehr stark gesenkt werden können, könnten auch aus Strom erzeugte Kohlenwasserstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquid) eine Rolle spielen und sollten weiter erforscht werden

10. **Diversifizierung der Forschung.** Aufgrund der substanziellen technologischen Unsicherheiten ist eine hinreichende technologische Diversität bzgl. der F&E Anstrengungen zu wahren, um potenziell wichtige Pfade nicht frühzeitig auszuschließen. Die gilt insbesondere vor dem Hintergrund des hohen Ambitionsniveaus einer 95%igen Reduktion der Treibhausgasemissionen. Aufgrund der hohen Bedeutung von Akzeptanz und Governance sollten auch diese Bereiche im Fokus der Forschung stehen.

## 11 Literatur

[Allwood et al. 2011] Allwood, J. M.; Ashby, M. F.; Gutowski, T. G. und Worrell, E.: *Material efficiency. A white paper*. Resources, Conservation and Recycling, 55 (2011).

[APS 2011] American Physical Society: *Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> with Chemicals. A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs*. Online: [www.aps.org/policy/reports/assessments/upload/dac2011.pdf](http://www.aps.org/policy/reports/assessments/upload/dac2011.pdf). Zugegriffen: 21. März 2017.

[BDH 2015] Bundesverband der deutschen Heizungsindustrie: *Jahresbilanz des Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie*. Online: [www.bdh-koeln.de/fileadmin/user\\_upload/pressemitteilungen\\_pdf/Marktentwicklung\\_Waermeerzeuger\\_2005-2015.pdf](http://www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/pressemitteilungen_pdf/Marktentwicklung_Waermeerzeuger_2005-2015.pdf). Zugegriffen: 21. März 2017.

[BMU 2014] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: *Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU).

[BMVBS 2015] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Verkehr in Zahlen 2015/2016*. Online: [www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/verkehr-in-zahlen\\_2015.html](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/verkehr-in-zahlen_2015.html). Zugegriffen: 23. Oktober 2016.

[BMVI 2016] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundesverkehrswegeplan 2030*. Online: [http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrspolitik/Verkehrsinfrastruktur/Bundesverkehrswegeplan2030/InhalteHerunterladen/inhalte\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrspolitik/Verkehrsinfrastruktur/Bundesverkehrswegeplan2030/InhalteHerunterladen/inhalte_node.html). Zugegriffen: 21. März 2017.

[BMWi 2015] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Die Energie der Zukunft. Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende*. Berlin.

[BMWi 2016] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *BMWi Energiedaten*. Online: <http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>. Zugegriffen: 21. März 2017.

[Brischke et al. 2015] Brischke, L.-A.; Leuser, L.; Thomas, S.; Spitzner, M.; Thema, J.; Ekardt, F.; Kopatz, M. und Duscha, M.: *Energiesuffizienz Rahmenanalyse (AP 1), Endbericht*. ifeu, Heidelberg.

[Brunke und Blesl 2014] Brunke, J.-C. und Blesl, M.: *Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs*. Journal of Cleaner Production, 82 (2014).

[BSW-Solar 2016] Bundesverband Solarwirtschaft e.V.: *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)*. Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW-

Solar). Online: [https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2013\\_2\\_BSW\\_Solar\\_Faktenblatt\\_Solarwaerme.pdf](https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2013_2_BSW_Solar_Faktenblatt_Solarwaerme.pdf). Zugegriffen: 21. März 2017.

[Bundesregierung 2010] Bundesregierung: *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Online: <http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf>. Zugegriffen: 21. März 2017.

[destatis 2015a] Statistisches Bundesamt: *Baufertigstellungen und Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach Art der Beheizung und Heizenergie, Lange Reihe ab 1980*. Wiesbaden.

[destatis 2015b] Statistisches Bundesamt: *Destatis, 2015. Destatis Pressemitteilung Nr. 235*. Statistisches Bundesamt (destatis). Online: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/06/PD15\\_235\\_413.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/06/PD15_235_413.html). Zugegriffen: 21. März 2017.

[Dewald und Achternbosch 2015] Dewald, U. und Achternbosch, M.: *Why did more sustainable cements failed so far? Disruptive innovations and their barriers in a basic industry*. Environmental Innovation and Societal Transitions (2015).

[Europäische Kommission 2011] Europäische Kommission: *Weißbuch - Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem*. Online: [http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011\\_white\\_paper\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011_white_paper_en.htm). Zugegriffen: 21. März 2017.

[Fischedick et al. 2014] Fischedick, M.; Marzinkowski, J.; Winzer, P. und Weigel, M.: *Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies*. Journal of Cleaner Production, 84 (2014).

[Gärtner et al. 2013] Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H. und Müller-Lindenlauf, M.: *Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz; Umweltauswirkungen Stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich; Studie gefördert durch BMU*. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU).

[Götz et al. 2016] Götz, M.; Lefebvre, J.; Mörs, F.; McDaniel Koch, A.; Graf, F.; Bajohr, S.; Reimert, R. und Kolb, T.: *Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review*. Review.

[Hermann et al. 2014] Hermann, H.; Emele, L. und Loreck, C.: *Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien*. Studie des Öko-Instituts. Öko-Institut e. V. (Öko-Institut). Online: [www.oeko.de/oeko-doc/2005/2014-021-de.pdf](http://www.oeko.de/oeko-doc/2005/2014-021-de.pdf). Zugegriffen: 30. Januar 2017.

[Holzhey 2014] Holzhey, M.: *Schienennetz 2025 / 2030: Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland*. UBA Texte 42/2010.

[House et al. 2011] House, K. Z.; Baclig, A. C.; Ranjan, M.; van Nierop, Ernst A. und Wilcox, J.: *Economic and energetic analysis of capturing CO<sub>2</sub> from ambient air*. PNAS vol. 108, 108 (2011).

[ITP et al. 2014] Intraplan Consult GmbH; Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH; Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG und Planco Consulting GmbH: *Verkehrsverflechtungsprognose 2030 Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs. Studie im Auftrag des BMVI als Bestandteil der BVWP, Dresden*.

[Kirchner et al. 2009] Kirchner, A.; Schlesinger, M.; Weinmann, B.; Hofer, P.; Rits, V.; Wünsch, M.; Koepp, M.; Kemper, L.; Zweers, U.; Straßburg, S.; Matthes, F. C.; Busche, J.; Graichen, V.; Zimmer, W.; Hermann, H.; Penninger, G. und Mohr, L. & Ziesing, H.-J.: *Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Im Auftrag des WWF*.

[Lackner 2009] Lackner, K. S.: *Capture of carbon dioxide from ambient air*. The European Physical Journal Special Topics (2009).

[Linz und Scherhorn 2011] Linz, M. und Scherhorn, G.: *Für eine Politik der Energie-Suffizienz: Impulse für die politische Debatte*. Online: [www.econs-tor.eu/handle/10419/59298](http://www.econs-tor.eu/handle/10419/59298). Zugegriffen: 30. Januar 2017.

[Mantau 2012] Mantau, U.: *Holzrohstoffbilanz Deutschland Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung von 1987 bis 2015*. Informationssysteme für Rohstoffe (INFRO); Universität Hamburg (UH).

[Nitsch et al. 2004a] Nitsch, J.; Krewitt, W.; Nast, M.; Viebahn, P.; Gärtner, S.; Pehnt, M.; Reinhardt, G.; Schmidt, R.; Uihlein, A.; Barthel, C.; Fishedick, M. und Merten, F.: *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Im Auftrag des BMU*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), IUS Weisser & Ness GmbH & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie (WI).

[Nitsch et al. 2004b] Nitsch, J.; Krewitt, W.; Nast, M.; Viebahn, P.; Gärtner, S.; Pehnt, M.; Reinhardt, G.; Schmidt, R.; Uihlein, A.; Scheurlen, K.; Barthel, C.; Fishedick, M. und Merten, F.: *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland*. Online: [www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/fachtagung\\_ee040512\\_07.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/fachtagung_ee040512_07.pdf).

[Repenning et al. 2015] Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Harthan, R.; Hennenberg, K.; Hermann, H.; Jörß, W.; Ludig, S.; Loreck, C.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Zell-Ziegler, C.; Braungardt, S.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Hartwig, J.; Kockat, J.; Pfluger, B.; Schade, W.; Schlomann, B.; Sensfuß, F. und Ziesing, H.: *Klimaschutzszenario 2050*.

[Ruser und Schulz 2015] Ruser, R. und Schulz, R.: *The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide N<sub>2</sub>O release from agricultural soils-a review*. J. Plant Nutr. Soil Sci., 178 (2015).

[Rüter und Diederichs 2012] Rüter, S. und Diederichs, S.: *Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie Nr. 2012/1, Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Hamburg.*

[Schade und Krail 2015] Schade, W. und Krail, M.: *Analyse der Effekte niedriger Ölpreise auf aktuelle Verkehrsszenarien. Arbeitspapier im Auftrag der Mercator Stiftung.*

[Schneider et al. 2011] Schneider, M.; Romer, M.; Tschudin, M. und Bolio, H.: *Sustainable cement production—present and future. Cement and Concrete Research*, 41 (2011).

[Skinner et al. 2010] Skinner, I.; van Essen, H.; Smokers, R. und Hill, N.: *EU Transport GHG: Routes to 2050? Towards the decarbonisation of the EU's transport sector by 2050. Bericht im Auftrag der EU Kommission DG Umwelt, London.*

[Smolinka et al. 2011] Smolinka, T.; Günther, M. und Garche, J.: *Stand und Entwicklungspotentiale zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Kurzfassung des Abschlussberichts. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE); FCBAT.*

[SRU 2015] Sachverständigenrat für Umweltfragen: *Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). Online: [http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02\\_Sondergutachten/2012\\_2016/2015\\_01\\_SG\\_Stickstoff\\_HD.html](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_HD.html). Zugegriffen: 01. März 2017.*

[Stemmermann et al. 2010] Stemmermann, P.; Schweike, U.; Garbev, K.; Beuchle, G. und Möller, H.: *Celitement—a sustainable prospect for the cement industry. Cement International*, 8 (2010).

[UBA 2013] Umweltbundesamt: *Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/potenzial-windenergie-an-land>. Zugegriffen: 21. März 2017.*

[UBA 2014] Umweltbundesamt: *Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050.*

[UBA 2016] Umweltbundesamt: *Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess. Umweltbundesamt (UBA). Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/integration-von-power-to-gas-power-to-liquid-in-den>.*

[Wietschel et al. 2015] Wietschel, M.; Haendel, M.; Boßmann, T.; Schubert, G.; Michaelis, J.; Doll, C.; Schломann, B.; Köppel, W. und Degünther, C.: *Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung, Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen. Fraunhofer ISI; KIT.*