



**POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN, INSTRUMENTE UND  
MASSNAHMEN ZUR ERREICHUNG VON CO<sub>2</sub>-NEUTRALITÄT:  
EINE SYNTHESE AUSGEWÄHLTER STUDIEN FÜR  
DEUTSCHLAND**

PROJEKT 1.2 | M-P1.2.3: SYNTHESE-STUDIE ZU POLITISCHEN  
INSTRUMENTEN UND REGULIERUNGEN

# POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN, INSTRUMENTE UND MASSNAHMEN ZUR ERREICHUNG VON CO<sub>2</sub>-NEUTRALITÄT: EINE SYNTHESE AUSGEWÄHLTER STUDIEN FÜR DEUTSCHLAND

## PROJEKT 1.2 | M-P1.2.3: SYNTHESE-STUDIE ZU POLITISCHEN INSTRUMENTEN UND REGULIERUNGEN

MAI 2021

### AUTORINNEN UND AUTOREN

Knut Görl, Markus Groth, Bettina Steuri, Sonja Simon, Stefan Vögele, Daniela Jacob

### Beteiligte Zentren:



## ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Synthesestudie fasst die wichtigsten Ergebnisse aus drei aktuellen Publikationen zusammen, die eine Transformation Deutschlands in eine CO<sub>2</sub>- bzw. klimaneutrale Wirtschaft und Gesellschaft bis spätestens zur Mitte dieses Jahrhundert beschreiben, einschließlich der dafür erforderlichen klimapolitischen Instrumente und Maßnahmen. Im Rahmen dieser Synthese werden auch Hindernisse und Unwägbarkeiten auf diesem Weg zu einem treibhausgasärmeren Deutschland umrissen, die es im Hinblick auf ein schwindendes CO<sub>2</sub>-Budget rasch zu adressieren gilt. Hauptziel dieser Synthese-Studie innerhalb von **Netto-Null-2050** ist es aufzuzeigen, welche zentralen klimapolitischen Schritte insbesondere in den Jahren bis 2030 zu fokussieren und umzusetzen sind, die zugleich zwingende Voraussetzungen für die Erreichung des Ziels einer CO<sub>2</sub>- bzw. Klimaneutralität Deutschlands darstellen.

## INHALT

ZUSAMMENFASSUNG .....	4
ABBILDUNGEN .....	6
TABELLEN .....	6
GLOSSAR .....	7
1 Einleitung .....	9
1.1 Helmholtz-Klima-Initiative .....	9
1.2 Cluster I: Netto-Null-2050 .....	10
1.3 Inhaltliche Abgrenzung und Aufbau der vorliegenden Synthese-Studie .....	12
2 Ergebnisse .....	14
2.1 CO <sub>2</sub> -Budget .....	14
2.2 Ausgewählte Studien zu CO <sub>2</sub> - bzw. Klimaneutralität in Deutschland im Synthese-Vergleich .....	16
2.2.1 Sektorale Maßnahmen .....	17
2.2.2 Sektorübergreifende Maßnahmen .....	22
2.2.3 Zusammenfassung und Bewertung zu den beiden synthetisierten Studien ...	25
3 Weitere relevante Studien und wichtige Aspekte im Hinblick auf die Transformation .....	28
3.1 Unwägbarkeiten und Risiken: Beispiel Wasserstoff .....	28
3.2 Unwägbarkeiten und Risiken: Beispiel Internationaler Energiecharta-Vertrag (ECT) ..	28
3.3 Abbau klimaschädlicher Subventionen .....	29
4 Zusammenfassendes Fazit .....	31
5. Weiterführende Aktivitäten im Rahmen von Netto-Null-2050 .....	32
DANKSAGUNG .....	34
LITERATUR .....	34
ANHANG: Eine Auswahl weiterführender Literatur zu fachverwandten Themen, sortiert nach Aktualität .....	38

## ABBILDUNGEN

<b>Abbildung 1:</b> Struktur der Helmholtz-Klima-Initiative .....	9
<b>Abbildung 2:</b> Struktur von Netto-Null-Zero-2050 .....	10
<b>Abbildung 3:</b> Verbleibendes CO <sub>2</sub> -Budget für Deutschland ab 1.Januar 2021 gemäß „Contraction and convergence“-Ansatz des Global Commons Institute (Meyer, A., 1999) und möglicher Reduktionspfad bis zum Erreichen von „Netto-Null“ bis 2050 (vgl. Mengis et al., 2020). .....	15
<b>Abbildung 4:</b> Notwendige Emissionsreduktion im Energiesystem unter dem in Netto-Null 2050 vorgegebenen CO <sub>2</sub> Budget/Carbon Budget (vorläufige Ergebnisse), ohne Berücksichtigung weiterer CDR-Maßnahmen und -Technologien. ....	33

## TABELLEN

<b>Tabelle 1</b> Vergleich: Die wichtigsten Parameter und Ergebnisse aus der Synthese der Studien 1 (Wuppertal Institut, 2020) und 2 (Prognos et al., 2020). .....	25
--	----

## GLOSSAR

AFOLU	Agriculture, Forestry, and Other Land Uses
BAU	Business-as-usual
BECCS	Bioenergy with Carbon Dioxide Capture and Storage
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CCC	British Committee on Climate Change
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage
CCU	Carbon Dioxide Capture and Utilisation
CCUS	Carbon Dioxide Capture, Utilisation and Storage
CH <sub>4</sub>	Methan (Kohlen-Tetrahydrid)
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> -eq	Kohlendioxid-Äquivalent
COP	Conference of the Parties (Weltklimakonferenz)
°C	Grad Celsius
DACS	Direct Air Capture and Storage
DACCS	Direct Air Carbon Dioxide Capture and Storage
EU	Europäische Union
EU-ETS	European Union Emissions Trading System
FuE	Forschung und Entwicklung
GtCO <sub>2</sub> -eq	Gigatonnen Kohlendioxid-Äquivalent
H <sub>2</sub>	Wasserstoff (Hydrogen)
IEA	Internationale Energie-Agentur
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
LT-LEDS	Long-Term Low Greenhouse Gas Emissions Development Strategies
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (Land Use, Land Use Change, and Forestry)
Mt	Megatonnen
MtCO <sub>2</sub> -eq	Megatonnen Kohlendioxid-Äquivalente

NBS	Naturbasierte Lösungen (Nature-Based Solutions)
NDC	Nationally Determined Contributions
NET	Negative Emissions-Technologien
PV	Photovoltaik
RCP	Representative Concentration Pathway
SDG	Sustainable Development Goals
THG	Treibhausgas(e)
UN	Vereinte Nationen (United Nations)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Klimarahmen-Konvention der Vereinten Nationen)

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 HELMHOLTZ-KLIMA-INITIATIVE<sup>1</sup>

Die am 1. Juli 2019 gestartete Helmholtz-Klima-Initiative konzentriert sich auf die Schwerpunkte „**Netto-Null-2050**“ (Mitigation), „Anpassung an Extrem-Ereignisse“ (Adaptation) sowie Kommunikation. In insgesamt 13 Forschungsprojekten treiben Helmholtz-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler ihre Klimaforschung voran (siehe **Abbildung 1**). Um die Auswirkungen des klimatischen Wandels systemisch zu erforschen und Lösungsmodelle für viele Lebenslagen zu entwickeln, arbeiten die Helmholtz-Expertinnen und -Experten an den Schnittstellen vieler Forschungsfelder stark vernetzt zusammen.

Ein besonderes Augenmerk legt die Klima-Initiative darauf, mit der Gesellschaft einen aktiven Austausch zu suchen. So ist es das Ziel, mit Verantwortlichen aus Politik und Wirtschaft, Medienschaffenden, der interessierten Öffentlichkeit und vor allem mit jungen Menschen in einen lebendigen Dialog treten. Die Helmholtz-Gemeinschaft versteht sich dabei in der Rolle des unabhängigen Vermittlers von aktuellen und wissenschaftsbasierten Fachinformationen, auf deren Grundlage ein aktiver Austausch mit Dialogpartnern vorgenommen wird, um so zentralen Herausforderung des Klimawandels gemeinsam zu begegnen.

Die Helmholtz-Klima-Initiative wird aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds des Helmholtz-Präsidenten finanziert und läuft vorerst bis Dezember 2021.

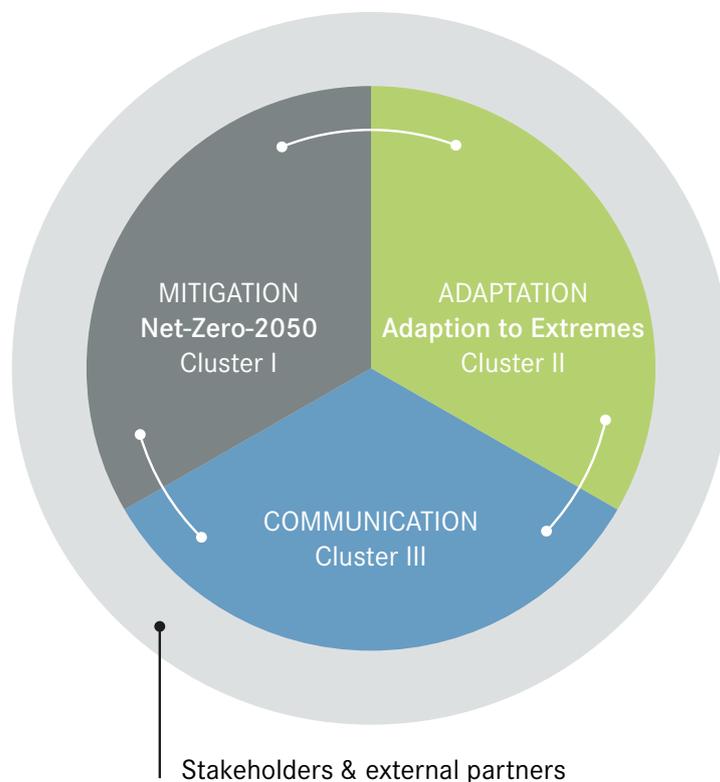


Abbildung 1: Struktur der Helmholtz-Klima-Initiative

<sup>1</sup> Weitere Informationen unter [www.helmholtz-klima.de](http://www.helmholtz-klima.de).

## 1.2 CLUSTER I: NETTO-NULL-2050

Eine Begrenzung des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur auf deutlich unter 2 Grad C gegenüber dem vorindustriellen Niveau ist grundsätzlich möglich - dies zeigt der Weltklimarat in seinem Sonderbericht über 1,5 °C globale Erwärmung (IPCC, 2018).

Wichtige Maßnahmen sind schnelle und weitreichende Reduktionen aller Treibhausgasemissionen, vor allem von Kohlendioxid. Darüber hinaus muss der Atmosphäre Kohlendioxid entzogen werden, welches dann in natürlichen Senken - wie zum Beispiel Böden und Wäldern - gespeichert wird. Zudem kann das der Atmosphäre entzogene Kohlendioxid durch chemische Prozesse wieder in Energieträger umgewandelt werden. Im Cluster I der [Helmholtz-Klima-Initiative](#) werden solche Strategien und neue Wege in vier Projekten im Hinblick auf die deutschen Rahmenbedingungen wissenschaftlich untersucht und bewertet (siehe **Abbildung 2**). Zusätzlich werden zwei Fallstudien mit Beteiligten aus der Praxis durchgeführt. Nähere Informationen zu den Projekten und ersten Ergebnissen dieses Clusters befinden sich unter [www.netto-null.org](http://www.netto-null.org). Das Projekt ist wie folgt organisiert:

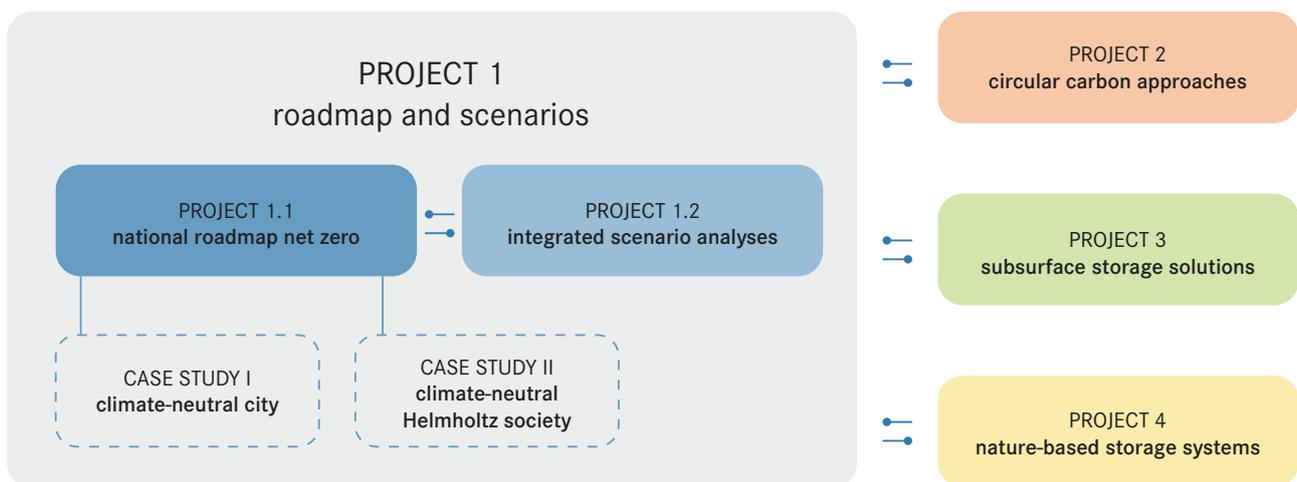


Abbildung 2: Struktur von Netto-Null-Zero-2050

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus insgesamt zehn Helmholtz-Zentren beteiligen sich an **Netto-Null-2050**. Das Projekt wird vom Climate Service Center Germany (GERICS) am Helmholtz-Zentrum Hereon koordiniert.

## WELCHE ERKENNTNISSE UND EINSCHÄTZUNGEN AUS DER HELMHOLTZ-KLIMA-INITIATIVE WURDEN BERÜCKSICHTIGT?

In Cluster I der Helmholtz-Klima-Initiative wurden drei Dokumente erarbeitet und veröffentlicht, die für die Ableitung wichtiger Strategien und Maßnahmen mit dem Ziel der Erstellung einer nationalen Roadmap „Netto Null“ von zentraler Bedeutung sind und daher an dieser Stelle gesondert hervorgehoben werden. Zum einen die Analyse und Berechnung des bis 2050 verbleibenden CO<sub>2</sub>-Budgets Deutschlands (Mengis et al., 2020, [Project Briefing #2](#)), zum anderen der Meilenstein [M-P 2.1](#), der sich auf die regulatorischen und ökonomischen Anforderungen für Technologien zur Entnahme und Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre fokussiert und regulatorische Lücken benennt ([Markus et al., 2020](#)). Außerdem ist ein Ansatz zur Systemdefinition sowie den Systemgrenzen erarbeitet worden (s.u., [Köhnke et al., 2020](#)).

Die Bedeutung des Project Briefings zum CO<sub>2</sub>-Budget liegt in der Definition eines mit Blick auf das globale CO<sub>2</sub>-Budget eng begrenzten Kohlenstoff-Emissions-Budgets für Deutschland bis zum Jahr 2050. Daran müssen sich, u.a. anhand zukünftiger globaler Emissionsverläufe, die obligatorischen Obergrenzen von CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit implizit auch die nationalen Emissions-Reduktionspfade für die kommenden drei Jahrzehnte orientieren. Auf dieser Basis wurde in Projekt 1 der Helmholtz-Klima-Initiative ein konsistenter Ansatz erarbeitet und veröffentlicht, der einen Übergang zur CO<sub>2</sub>-Neutralität Deutschlands bis zum Jahr 2050 modelliert und darstellt ([Thrän et al., 2020](#), [Project Briefing #1](#)). Daraus ergibt sich somit das Deutschland noch zur Verfügung stehende CO<sub>2</sub>-Budget, aus dem sich weitere konsistente Ansätze zu Klimaschutzpfaden und -einzelmaßnahmen – sektoral wie sektorübergreifend – ableiten lassen.

Der Meilenstein zu regulatorischen und ökonomischen Anforderungen für Technologien zur Entnahme und Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre ([Markus et al., 2020](#)) adressiert insbesondere die vielfältigen rahmensetzenden Gesetzeswerke auf verschiedenen Ebenen. Diese sind für die Genehmigung, den Betrieb, die markt begründenden Aktivitäten der zu beteiligenden Akteure, einen potenziellen Markteinstieg dieser Technologien sowie eine klimafreundliche Nutzung der daraus gewonnenen Produkte im Bereich „Carbon Dioxide Removal“-Technologien (CDR) wesentlich und können zugleich limitierend wirken. Dieser Meilenstein hat dies beispielhaft anhand der „Direct Air Capture“-Technologie (DAC) untersucht.

Ein weiterer Report im Rahmen der Helmholtz-Klima-Initiative fokussiert sich auf die Definition des betrachteten Systems und seiner Grenzen mit dem Ziel einer räumlichen und sektoralen Zuordnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu den verschiedenen Systemkomponenten. Außerdem wird darin ein Systemrahmen spezifiziert, der den Kontext für das auf Kohlenstoffemissionen basierende System bildet. Dieses umfasst beispielsweise auch den rechtlichen und politischen Kontext sowie die Integration der Hauptakteure bzw. -akteursgruppen ([Köhnke, et al., 2020](#)).

### 1.3 INHALTLICHE ABGRENZUNG UND AUFBAU DER VORLIEGENDEN SYNTHESE-STUDIE

Die Formulierung konsistenter und realistischer Handlungsempfehlungen zu gangbaren Pfaden für die Erreichung der CO<sub>2</sub>-Neutralität bis spätestens 2050 erfordert zum einen die Bestandsaufnahme der in diesem Kontext bereits vorliegenden politisch-regulatorischen Rahmenbedingungen, Instrumente und Maßnahmen auf nationaler und internationaler Ebene. Zum anderen müssen im Falle einer signifikanten Inkonsistenz der bislang daraus abgeleiteten klimapolitischen Strategien und Maßnahmen mit einem noch zur Verfügung stehenden verbleibenden nationalen CO<sub>2</sub>-Budget (siehe dazu auch das am 29. April 2021 veröffentlichte Urteil des Bundesverfassungsgerichtes, BVerfG, 2021) mögliche alternative und zugleich als umsetzbar erscheinende CO<sub>2</sub>-Reduktionspfade aufgezeigt werden, die sich in Umfang und/oder Umsetzungsgeschwindigkeit sowie ggf. Monitoring- und Nachsteuerungspflichten von den bisher existierenden Ansätzen deutlich unterscheiden. „Instrumente“ bezeichnen hierbei die zur Zielerreichung einzusetzenden Mittel und Steuerungselemente während mit „Maßnahmen“ die konkreten Einzelelemente einer übergeordneten (längerfristigen) Strategie zur Umsetzung und Zielrealisierung gemeint sind.

Die vorliegende Synthese-Studie führt daher zunächst die im Rahmen zweier Arbeitspakete der Helmholtz-Klima-Initiative mit einer Übersicht zu bereits existierenden politischen Rahmensetzungen, Instrumenten und Maßnahmen zur Erreichung eines CO<sub>2</sub>-neutralen Deutschland (Markus et al., 2020, M-P 2.1) sowie zum verbleibenden nationalen CO<sub>2</sub>-Budget (Mengis et al., 2020; [Project Briefing #2](#)) erarbeiteten Ergebnisse zusammen. Zudem umreißt sie überblicksartig den aktuellen Forschungsstand mit einem besonderen Fokus auf zentralen und dringend zu adressierenden Handlungs- und Umsetzungsdefiziten auf dem Weg zu einem CO<sub>2</sub>-neutralen Deutschland bis 2050. Darüber hinaus benennt sie anhand einer Synthese aus drei aktuellen klimapolitischen Studien mögliche Alternativstrategien und -pfade und identifiziert noch bestehende Wissenslücken und potenzielle Forschungsbedarfe in diesem Bereich.

Die gewonnenen Ergebnisse daraus werden auch in die zentralen Produkte eingehen, die im Rahmen von P1.1 entwickelt werden. Dazu gehören u.a. der nationale Web-Atlas sowie die Roadmap „[Netto-Null-2050](#)“, welche den Beitrag der Helmholtz-Gemeinschaft zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Neutralität in Deutschland bis 2050 aufzeigen.

Für Erstellung dieser Studie wurde die seit Unterzeichnung des Pariser Klimaabkommens im Dezember 2015 publizierte wissenschaftliche Literatur zu diesem Themenbereich herangezogen, wobei der regionale Fokus auf Deutschland und den regulatorischen Verflechtungen zwischen Deutschland und der Europäischen Union liegt.

Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf drei im Jahr 2020 erschienene Publikationen gelegt, die sich u.a. eingehend möglichen Dekarbonisierungspfaden für Deutschland bis zum Jahr 2035 bzw. 2050 sowie der Adressierung klimaschädlicher Subventionen gewidmet haben. Die erste dieser drei Studien hat zudem einige Denkanstöße zu Zielsetzungen aus deutscher Perspektive auf Basis eng begrenzter noch verfügbarer Restmengen von CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Erreichen wichtiger Temperaturgrenzen geliefert:

1. CO<sub>2</sub>-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze. Bericht. Wuppertal (nachfolgend im Text genannt: Wuppertal Institut, 2020),
2. Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität (Prognos et al., 2020),

3. „Zehn klimaschädliche Subventionen im Fokus – Wie ein Subventionsabbau den Klimaschutz voranbringt und den Bundeshaushalt entlastet“. Eine Studie des Forums Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft im Auftrag von Greenpeace (Beermann et al., 2020).

Die oben genannten drei Studien wurden exzerpiert und die jeweiligen Kernaussagen zu den wichtigsten Maßnahmen, geordnet nach den zentralen Sektoren, sektorübergreifenden Aspekten und Handlungsbedarfen zusammengefasst. Aufgrund der thematischen Nähe wurden die Ergebnisse aus den ersten beiden genannten Studien sowohl synthetisiert als auch die zentralen Unterschiede hinsichtlich der Ergebnisse und Akzentuierungen zwischen diesen beiden Studien tabellarisch gegenübergestellt (siehe unten, Kapitel 2.2.3).

**Zur thematischen Eingrenzung:** Eine Vielzahl von Publikationen (siehe Anhang), die insbesondere seit der Unterzeichnung des Pariser Klimaabkommens (Dezember 2015) erschienen sind, haben sich mit diversen Aspekten der Klimapolitik aus deutscher und europäischer Perspektive sowie daraus abzuleitenden Klimaschutzstrategien und -maßnahmen auf unterschiedlichen Zeitachsen sowohl sektoral als auch sektorübergreifend auseinander gesetzt<sup>2</sup>.

Dieser Report ist wie folgt aufgebaut: In den Kapiteln 2 und 3 werden die wichtigsten Ergebnisse aus den zwei oben genannten synthetisierten Studien, der Studie zu klimaschädlichen Subventionen sowie weiteren wichtigen Aspekten und bestehenden Hindernissen auf dem Weg zu einer CO<sub>2</sub>- bzw. Klimaneutralität Deutschlands vorgestellt. Im Zuge dessen werden auch mittelfristige Handlungsoptionen und -erfordernisse für die kommenden zehn Jahre aufgezeigt sowie relevante Ergebnisse der Helmholtz-Klima-Initiative skizziert. Nach einem zusammenfassenden Fazit in Kapitel 4 gibt Kapitel 5 abschließend einen kurzen Ausblick auf bestehende Wissenslücken und Forschungsbedarfe sowie in diesem Zusammenhang noch zu erwartende Produkte im Rahmen der Helmholtz-Klima-Initiative.

---

<sup>2</sup> Eine Auswahl an Publikationen zu diesen Themen ist im Anhang aufgeführt; diese Themenbereiche werden daher im Rahmen dieser Synthese nicht weiter vertieft.

## 2 ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die wichtigsten Voraussetzungen und Parameter, die für die Entwicklung und Umsetzung einer zielführenden Strategie auf dem Weg zur CO<sub>2</sub>- bzw. Klimaneutralität Deutschlands wesentlich sind<sup>3</sup>, zusammengefasst. Grundlage hierfür sind zwei im letzten Jahr erschienene Studien (Wuppertal Institut, 2020 und Prognos et al., 2020), in denen die hierfür wesentlichen Faktoren thematisiert und diskutiert wurden. Diese Studien setzen hierbei unterschiedliche Umsetzungsgeschwindigkeiten hinsichtlich der Maßnahmen sowie Treibhausgas (THG)-Reduktionsschritte für die Erreichung von Zwischen- und Endzielen in puncto Klimaneutralität voraus. Die wichtigsten Parameter werden unter 2.2.3 noch einmal tabellarisch gegenübergestellt und die Ergebnisse aus beiden Studien kritisch gewürdigt. In diesem Kontext wird darauf hingewiesen, dass die erste Studie (Wuppertal Institut, 2020) eine CO<sub>2</sub>-Neutralität Deutschlands fokussiert, wohingegen die zweite Studie (Prognos et al., 2020) auf eine Klimaneutralität Deutschlands abhebt.

Über die Synthese dieser beiden Studien hinaus wurde eine dritte Publikation näher betrachtet, die im Besonderen den Abbau klimaschädlicher Subventionen adressiert. (Beermann et al., 2020). Zudem werden unter Kapitel 3 mögliche übergeordnete Risiken und Unwägbarkeiten hinsichtlich einer – notwendigen – raschen Umsetzbarkeit schlaglichtartig angerissen, und anhand eines politischen (Energie-Charta-Vertrag, ECT) sowie eines technisch-logistischen Beispiels (Verfügbarkeit grünen Wasserstoffs) betrachtet.

Eine zentrale Rahmensetzung zur Verdeutlichung der Dringlichkeit und notwendigen Geschwindigkeit des Klimaschutzes ist das verbleibende CO<sub>2</sub>-Budget für Deutschland, da eine breite Diskussion dazu aktuell umso dringlicher erscheint als die sich daraus abzuleitenden klimapolitischen Regelwerke und Einzelmaßnahmen auf nationaler und europäischer Ebene fundamental sowohl in Umfang als auch Umsetzungszeiten von den bisher ergriffenen Strategien und Politiken unterscheiden können.

### 2.1 CO<sub>2</sub>-BUDGET

Basierend auf dem Weltklimarat (IPCC, 2018, table 2.2) beläuft sich mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% und ausgehend vom 1.1.2018 das verbleibende CO<sub>2</sub>-Budget zur Erreichung einer globalen Erwärmung von maximal 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf rd. 1.170 Gt CO<sub>2</sub>. Für eine entsprechende Erwärmung von maximal 1,5°C beträgt dieses verbleibende globale CO<sub>2</sub>-Budget bei gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit und gleichem zeitlichem Ausgangspunkt rd. 420 Gt CO<sub>2</sub>. Um, wie im Pariser Klimaabkommen erklärt, Bemühungen zu unternehmen, die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen, läge das globale CO<sub>2</sub>-Budget bei 580 Gt CO<sub>2</sub> für eine Wahrscheinlichkeit von 50% (420 Gt CO<sub>2</sub> für eine 67%ige und 840 GtCO<sub>2</sub> für eine 33%ige Wahrscheinlichkeit; IPCC, 2018)<sup>4</sup>.

Für ein auf die jeweilige nationale Ebene heruntergebrochenes CO<sub>2</sub>-Restbudget werden unterschiedliche Berechnungsansätze verfolgt, aus denen jeweils ein CO<sub>2</sub>-Restbudget für Deutschland bis zum Jahre 2100 resultiert. Dieses Budget muss zudem auf den verbleibenden Zeitraum bis 2050 heruntergebrochen werden. Wesentliche Determinanten für die Kalkulation dieses Restbudgets sind – je nach Ansatz – entweder die

3 Unter „CO<sub>2</sub>-Neutralität“ versteht man eine Verringerung anthropogener Kohlendioxid-Emissionen auf (Netto-) Null. Damit ist diese Voraussetzung für eine „Klimaneutralität“, welche eine (Netto-)Null-Reduktion aller anthropogenen Treibhausgase beschreibt, siehe IPCC-Glossar unter [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/sr15\\_glossary.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/sr15_glossary.pdf)

4 In einer im Januar 2021 veröffentlichten Studie wurde das verbleibende globale CO<sub>2</sub>-Budget unter Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren neu berechnet: Damon Matthews, H., Tokarska, K.B., Rogelj, J. et al. (2021): An integrated approach to quantifying uncertainties in the remaining carbon budget. *Commun Earth Environ* 2, 7 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00064-9>

Bevölkerungszahl und -entwicklung im jeweiligen Land („Equal-per-capita-Ansatz“) oder das Volumen des aktuellen Anteils an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen („Grandfathering-Ansatz“).

Hierzu wurde in Projekt 1 von Cluster I der Helmholtz-Klima-Initiative ein unter Einbeziehung der globalen geophysikalischen Grundlagen für die Kohlenstoffhaushalte konsistenter nationaler Berechnungsansatz angewendet und veröffentlicht, der ein Rest-Budget bis zum Übergang zur CO<sub>2</sub>-Neutralität Deutschlands zum Jahr 2050 vorgibt (Mengis, et al., 2020, [Project Briefing #2](#), siehe [Abbildung 3](#)). Um seinen im Rahmen des Pariser Klimaabkommens abgegebenen Verpflichtungen zur Begrenzung der Erderwärmung auf höchstens 1,5°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau bis zum Ende dieses Jahrhunderts nachzukommen, steht Deutschland demnach seit dem 1. Januar 2018 noch ein Rest-Budget von 10 Gt CO<sub>2</sub> (seit dem 1. Januar 2021: 7,7 Gt CO<sub>2</sub>) bis zum Erreichen von Netto-Null-CO<sub>2</sub>-Emissionen spätestens im Jahr 2050 zu. Dieses Budget wurde mit dem „Contraction and convergence“-Ansatz des Global Commons Institute berechnet (Meyer, A., 1999) und nimmt mit sowohl Rücksicht darauf, dass Deutschland aufgrund der bestehenden Infrastruktur einen gewissen Lock-In überwinden muss, als auch auf die Größe des deutschen Budgets gemäß „Equal-per-capita“-Berechnung.

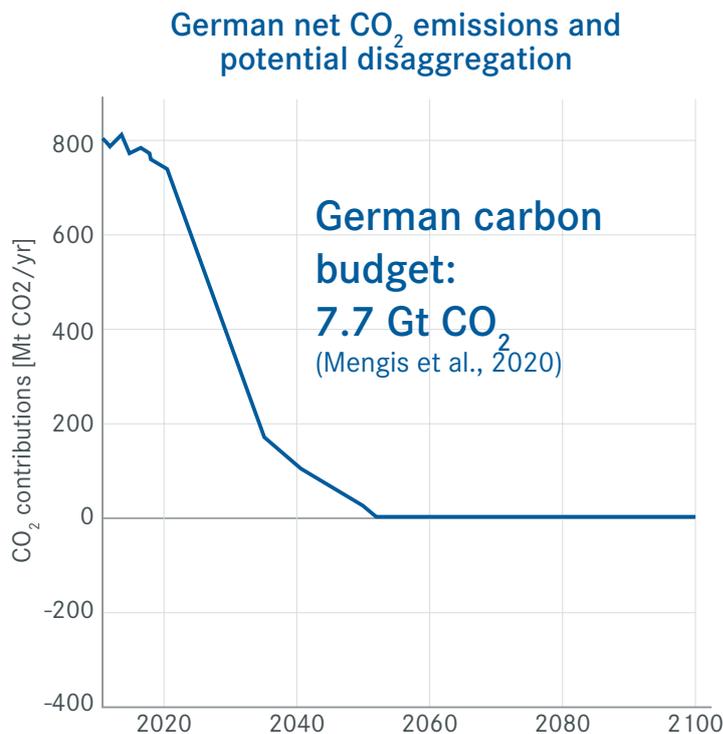


Abbildung 3: Verbleibendes CO<sub>2</sub>-Budget für Deutschland ab 1. Januar 2021 gemäß „Contraction and convergence“-Ansatz des Global Commons Institute (Meyer, A., 1999) und möglicher Reduktionspfad bis zum Erreichen von „Netto-Null“ bis 2050 (vgl. Mengis et al., 2020).

Dies entspricht vom 1.1.2021 bis zum 1.1.2050 einem durchschnittlichen Emissionsvolumen von rund 265 Mt CO<sub>2</sub> pro Jahr. Dabei wird wobei vorausgesetzt, dass zunächst deutlich höheren jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu Beginn der Übergangsphase, d.h. bis zur Überwindung des Lock-Ins, auf dem Pfad hin zur CO<sub>2</sub>-Neutralität rasche und nachhaltige CO<sub>2</sub>-Reduktionen folgen müssen (jährliche Reduktion der deutschen Emissionen von rund 40 Mt CO<sub>2</sub> pro Jahr). Spätestens in der Schlussphase wird es eine Notwendigkeit geben, Emissions-Vermeidungs-Maßnahmen durch Methoden und Technologien zum Entzug der nicht vermeidbaren CO<sub>2</sub>-Restemissionen aus der Atmosphäre (CDR) zu ergänzen (IPCC, 2018, Chapter 2).

Die in Studie 1 zugrunde gelegte und an den Erkenntnissen des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) orientierte Berechnung, geht demgegenüber mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% von einem verfügbaren CO<sub>2</sub>-Restbudget von 4,2 Gt CO<sub>2</sub> für Deutschland ab 1.1.2020 auf Basis des „Equal-per-capita“-Ansatzes aus (Wuppertal Institut, 2020, 10, SRU, 2020a, 19, SRU, 2020b, 52). Da dieser Studie zudem keine zumindest mittelfristige Verfügbarkeit von CDR-Verfahren und -technologien zugrunde liegt, folgt daraus eine obligatorische Erreichung des CO<sub>2</sub>-Neutralitätsziels Deutschlands somit bereits deutlich früher, nämlich bis spätestens zum Jahre 2035. Dies erfordert, mit einem besonderen Fokus auf den derzeit größten inländischen CO<sub>2</sub>-Emitenten, eine besonders starke Treibhausgasreduktion in den 2020er Jahren, bei einer mittleren Reduktion von 60 bis 70 Mt CO<sub>2</sub> p.a. (durchschnittliche THG-Reduktion in Deutschland seit 2010: 8 Mt CO<sub>2</sub>; Wuppertal Institut 2020, 10).

## 2.2 AUSGEWÄHLTE STUDIEN ZU CO<sub>2</sub>- BZW. KLIMANEUTRALITÄT IN DEUTSCHLAND IM SYNTHESE-VERGLEICH

In den beiden dieser Synthese zugrunde gelegten Studien zur CO<sub>2</sub>-Neutralität (Wuppertal Institut, 2020) bzw. Klimaneutralität Deutschlands (Prognos et al., 2020) wurden Ansätze und Szenarien entwickelt, die teils deutlich über die im Klimaschutzprogramm und Klimaschutzgesetz der Bundesregierung (Klimaschutzplan 2050 vom November 2016 und Klimaschutzprogramm vom Herbst 2019 mit Zielen für 2030: Klimaschutzgesetz, Kohleausstiegsgesetz und Brennstoffemissionshandelsgesetz / BMU, 2016; Bundesanzeiger, 2019; Bundesanzeiger, 2020; BMJ, 2019) festgelegte Ziele hinausgehen. Zudem werden insbesondere auch die Hemmnisse bei der Umsetzung des CO<sub>2</sub>- bzw. Klimaneutralitätsziels 2050 diskutiert (Prognos et al., 2020, 10).

Für eine zusätzliche Beschleunigung dieser Transformation mit dem Ziel der einer CO<sub>2</sub>- bzw. Klimaneutralität vor 2050 werden außer einer signifikanten Erhöhung von Umsetzungsgeschwindigkeiten eine smarte Technologieauswahl, eine konsequente Einbeziehung/Umsetzung der Kreislaufwirtschaft sowie, insbesondere eine stärkere Betonung von Suffizienzstrategien und nachhaltigen Konsummustern (Wuppertal Institut, 2020, 12) hervorgehoben. Eine wesentliche Prämisse ist dabei die Fokussierung auf die größten inländischen Emittenten und das Treibhausgas CO<sub>2</sub>. Zudem wurde in dieser Studie kein in sich konsistentes Szenario bis 2035 entwickelt und keine Priorisierung unterschiedlicher Handlungsoptionen vorgenommen. (Wuppertal Institut, 2020, 10).

Laut aktuellem Projektionsbericht für das Bundesumweltministerium (BMU) und den Energiewirtschaftlichen Projektionen zum Klimaschutzprogramm 2030 für das Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) reichen die aktuellen Politikmaßnahmen nicht aus, um eine Minderung der deutschen Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55% - bezogen auf das Ausgangsjahr 1990 -, zu erreichen (Prognos et al., 2020, 18).

Demgegenüber geht die Studie von Prognos, et al. (2020) bis 2030 mittels erheblich verstärkter Dekarbonisierungs-Anstrengungen auf nationaler Ebene von einer entsprechenden THG-Reduktionsrate von 65% aus (Basisjahr: 1990; Prognos et al., 2020, 9), während in der Studie des Wuppertal Institutes eine Erreichbarkeit mindestens einer CO<sub>2</sub>-Neutralität Deutschlands bis 2035 als machbar erachtet wird (Wuppertal Institut, 2020, 12). Dieses Neutralitätsziel unterscheidet sich somit beträchtlich sowohl hinsichtlich der Reduktionspfade als auch der dafür erforderlichen Strategien und Maßnahmen der Bundesregierung wie auch den bislang in zahlreichen anderen Studien und Roadmaps zugrunde gelegten Zielen und Maßnahmen für eine THG- bzw. CO<sub>2</sub>-Neutralität bis spätestens 2050. Hierbei gilt ein Ausgleich nicht vermeidbarer Kohlenstoff-basierter Restemissionen durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Lagerung als unumgänglich (Prognos et al. 2020, 9).

Beide Studien gehen davon aus, dass ein „Weiter so“ (BAU-Szenarien) angesichts eines weltweit hohen Handlungsdrucks keine Option mehr darstellt (Wuppertal Institut, 2020, 10; Prognos et al., 2020, 12), wenngleich das ambitioniertere Ziel einer CO<sub>2</sub>-Neutralität bis 2035 unter dem Vorbehalt einer Verfügbarkeit entsprechender Technologien, notwendiger Planungs- und Genehmigungsprozesse und anderer Einflussfaktoren steht (Wuppertal Institut, 2020, 12). Letztlich unterscheidet sich der in der Wuppertal-Studie aufgezeigte CO<sub>2</sub>-Neutralitätspfad weniger anhand der vorgestellten Maßnahmen als vielmehr durch eine im Vergleich zu anderen Studien und Roadmaps signifikant höhere Umsetzungsgeschwindigkeit, etwa im Hinblick auf Zu- und Umbauraten (Wuppertal Institut, 2020, 12). Auch hinsichtlich der Geschwindigkeit der Einführung und Marktdurchdringung klimaneutraler Brennstoffe werden in dieser Veröffentlichung deutlich ambitioniertere Zielgrößen zugrunde gelegt als in anderen Studien (Wuppertal Institut, 2020, 16).

In der Studie von Prognos et al. (2020) wird in den zugrunde gelegten Klimaschutz-Szenarien und -Pfad kein nennenswerter Verzicht hinsichtlich des persönlichen Konsumverhaltens oder im Hinblick auf Wohnflächen sowie Mobilität unterstellt. Auch der Industriestandort Deutschland soll sein hohes Produktionsniveau erhalten. Insgesamt wird von einem durchschnittlichen jährlichen Wirtschaftswachstum bis 2050 von 1,3% ausgegangen. Abgesehen vom Gebäudesektor werden sämtliche Investitionen – bei einer grundlegenden, den Investitionsstau beseitigenden Erneuerung der Verkehrs- und Energieinfrastruktur – im Rahmen gewöhnlicher Modernisierungszyklen sowie unter dem Paradigma der Wirtschaftlichkeit getätigt (Prognos et al., 2020, 10f. und 15).

Eine Steigerung des Klimaziels für 2030 setzt demnach eine signifikante Beschleunigung der Energie-, Verkehrs- und Wärmewende voraus, darunter einen vollständigen Kohleausstieg bis 2030, die Zielerhöhung des Erneuerbaren-Anteils am Strom auf etwa 70%, 14 registrierte Millionen Elektroautos, 6 Millionen installierte Wärmepumpen, eine Erhöhung der Sanierungsrate um mindestens 50% sowie die Nutzung von gut 60 TWh „grünen“, also klimaneutralem Wasserstoff (Prognos et al., 2020, 12).

Gemäß Prognos et al. (2020) zieht das übergeordnete Ziel der Klimaneutralität auch ein umfassendes Modernisierungs- und Investitionsprogramm für Deutschland mit vielfältigen volkswirtschaftlichen Impulsen, vergleichbar mit dem Wirtschaftswunder der 1950er und 1960er Jahre, nach sich (Prognos et al., 2020, 10).

## 2.2.1 SEKTORALE MASSNAHMEN

Zur Erreichung des Ziels einer CO<sub>2</sub>- bzw. Klimaneutralität in Deutschland sind gemäß beiden Studien besondere Anstrengungen vor allem in den folgenden vier Sektoren erforderlich (Wuppertal Institut, 2020, 12; Prognos et al., 2020, 17):

- Energiewirtschaft
- Industrie
- Verkehr
- Gebäudebereich

Ein maßgeblicher Anteil dieser Treibhausgasreduktion ist dabei durch den Energiewirtschaftssektor zu erbringen, unterstützt und forciert durch einen signifikant erhöhten CO<sub>2</sub>-Preis (mindestens 50 €/Tonne CO<sub>2</sub>), ein verschärftes Regelwerk beim europäischen Emissionszertifikate-Handel sowie eine umfassende Reform der Steuern, Abgaben und Umlagen auf Energie (Prognos et al., 2020, 13). Hierbei sind eine Erhöhung sozialer

Ungleichgewichte auf Basis eines „Just-transition-Ansatzes“ mit Hilfe ergänzender, progressiv umverteilernder Politikinstrumente unbedingt zu vermeiden (Wuppertal Institut, 2020, 13).

Zur Erreichung der Reduktionsziele in diesem Sektor unterstellen beide Studien einen deutlich früheren Ausstieg aus der Kohleverstromung als im derzeit gültigen deutschen Klimaschutzgesetz vorgesehen, mit dem spätesten Enddatum 2030 bzw. 2035 (Wuppertal Institut, 2020, 14; Prognos et al., 2020, 10, 12 und 20).

Da auf der anderen Seite im gleichen Zeitraum als auch darüber hinaus in langfristiger Perspektive sowohl die Stromproduktionsmengen aus Erneuerbaren Energien signifikant zu erhöhen sind als auch eine dauerhaft stärker strombasierte Energienachfrage über allen Sektoren hinweg abgedeckt werden muss, ergeben sich weiterhin erhebliche Regelungs-, Investitions- und Umsetzungsbedarfe (Wuppertal Institut, 2020, 13ff., Prognos et al., 2020, 20 und 22). Zudem muss ein komplett auf Erneuerbaren Energien basierendes Stromsystem 2050 etwa 50% mehr Strom produzieren und weiterleiten (Prognos et al., 2020, 12). Daraus ergeben sich für den Sektor Energiewirtschaft folgende politische **Maßnahmen**:

- Windenergieausbau: Stärkere Beteiligung von Anwohner\*innen und Kommunen am Betrieb und den Einnahmen von Windkraftanlagen, stärkere und schnellere Abstimmung mit den Zielen von Landschafts- und Naturschutz,
- eine Installations- und Nutzungspflicht für PV-Anlagen bei Neubauten und Dachsanierungen,
- ein schnellerer Aus- und Umbau der Stromnetze und Speichertechnologien sowie eine Erhöhung der Nachfrageflexibilität, etwa durch Sektorkopplung (Wuppertal Institut, 2020, 13).

Das Ziel einer vollständigen CO<sub>2</sub>-Freiheit von Strom- und Fernwärmeerzeugung setzt die Implementierung eines gut aufeinander abgestimmten Instrumentenmixes seitens der Politik voraus: Eine intelligente Kombination von marktbasierenden Anreizen, Förderungen und Ordnungsrecht (Prognos et al., 2020, 13 und 22). Als wichtigste **Einzelmaßnahmen** in diesem Sektor sind zu nennen:

- Erhöhter Zubau der Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung, der kontinuierlich bis mindestens 2050 fortgesetzt wird,
- Beginn der Wasserstoffnutzung in Kraftwerken und KWK-Anlagen bis hin zur vollständigen Ablösung von Erdgas durch Wasserstoff für die Residualstromerzeugung ab 2040,
- Forcierung des Kohleausstiegs durch EU-ETS-Anpassung und dadurch veränderte Marktbedingungen (Prognos et al., 2020, 13 und 22).

Für den **Industriesektor** steht als Resultat aus beiden Studien im absehbaren Zeitraum bis 2035 nur eine recht überschaubare Anzahl von Technologien zur Dekarbonisierung zur Verfügung. Zudem steht im Rahmen von Innovationszyklen rund die Hälfte der Industrieanlagen in der deutschen Grundstoffindustrie in den nächsten zehn Jahren vor Reinvestitionen (Prognos et al. 2020, 13). Im Hinblick darauf sowie die lange Lebensdauer industrieller Anlagen ist die Gefahr eines perspektivischen Lock-In-Effektes zu adressieren. Mithin sind Investitionen in „Stranded Assets“ vor dem Hintergrund einer sukzessiv ausschließlichen Genehmigungsfähigkeit CO<sub>2</sub>-/THG-neutraler Technologien a priori zu vermeiden (Wuppertal Institut, 2020, 16; Prognos et al., 2020, 10).

**Wesentliche Stellschrauben** für eine klimafreundliche Transformation des Industriesektors sind u.a. (Wuppertal Institut 2020, 16f.; Prognos et al., 2020, 20):

- ein Ersatz fossiler Energieträger in Industriekraftwerken,
- die Elektrifizierung von Industrie-Heizsystemen,
- der Ersatz fossiler Grundstoffe in der chemischen Industrie durch Kreislaufführung,
- der Einsatz biogener, nachhaltig erzeugter Materialien,
- die Entwicklung und Anwendung neuer Prozesse in zentralen Grundstoffindustrien,
- die Nutzung eines ohnehin anstehenden Reinvestitionszyklus,
- ein verstärkter Wasserstoffeinsatz,
- ein Aufbau von CCS-Anlagen in der Zementindustrie,
- hohe staatliche Unterstützungsinvestitionen und Transformationsprogramme für die Industrie,
- wichtige flankierende Maßnahmen zur wettbewerblichen Stärkung und zur Vermeidung von Produktionsverlagerungen ins Ausland („carbon leakage“).

Ab dem Jahr 2030 und bis 2050 sind im Industriesektor ergänzend weitere Fortschritte notwendig (Prognos et al., 2020, 22):

- Sukzessiver Ersatz chemischer Rohstoffe (Feedstocks) durch chemisches Recycling und synthetischer, auf nicht-fossilem CO<sub>2</sub> beruhender Einsatzstoffe.
- Schaffung umfassender Infrastrukturen zum Auffangen der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Zementindustrie.

Übergeordnet – und durchaus mit sektorenübergreifender Reichweite – ist ein konsequenter und schneller Aufbau einer Kreislaufwirtschaft unter dem Prinzip „Reduce, reuse, recyle“ erforderlich (Wuppertal Institut, 2020, 16).

Vor dem Hintergrund einer Stagnation der THG-Emissionen im Verkehrssektor über die vergangenen drei Jahrzehnte erfordert eine Mobilitätswende („Mobilitätsveränderungen bei Mobilitätserhalt“, Prognos et al., 2020, 20) neben einer übergeordnet deutlichen Reduktion von Verkehren eine größtmögliche Verlagerung von Transportvolumen in allen Subsektoren auf den Umweltverbund – Güterbahn, Fernbahn/ÖPNV, Rad- und Fußverkehr – und eine Effizienzerhöhung bei den Verkehrsmitteln. Unter der Annahme einer gleichbleibenden Personenverkehrsleistung im Vergleich zum heutigen Niveau müssen jedoch die Auslastungen beispielsweise durch Pooling sowie durch die verstärkte Nutzung des Umweltverbundes steigen (Prognos et al., 2020, 22).

Übergeordnet ist ein konsequentes Zusammenspiel von Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und Verbesserung der Verkehrsabläufe erforderlich (Wuppertal Institut, 2020, 17).

Als **weitere zentrale Maßnahmen** sind insbesondere die folgenden hervorzuheben:

- Eine möglichst vollständige Elektrifizierung von Pkw- und Güterverkehr, inklusive Schaffung einer Überleitungs-Infrastruktur, sowie angesichts langer Nutzungs- und Überlebensdauern möglichst kurze Übergangsfristen. Eine forcierte Einführung der E-Mobilität bis 2030 (Zielwert: 14 Millionen Fahrzeuge), die auch konsistent mit den verschärften EU-Flottengrenzwerten sein muss, ist entscheidend von nationaler

Gesetzgebung abhängig (Wuppertal Institut, 2020; Prognos et al., 2020, 13).

- Der Betrieb schwer elektrifizierbarer Transportmittel mit klimafreundlichen (synthetischen) Kraftstoffen. (Wuppertal Institut, 2020, 17),
- Eigene Verkehrswenden für den Flug- und Schiffsverkehr (Wechsel der Antriebssysteme, Einsatz klimafreundlicher / synthetischer Kraftstoffe, Verkehrsreduktionen, etc.) (Wuppertal Institut, 2020, 18f.).

Hinzukommen muss eine Abkehr vom langjährigen Paradigma der autogerechten Stadt im Zuge einer klimafreundlichen Umgestaltung urbaner Räume. Als damit assoziierte Co-Benefits sind beispielsweise eine Verbesserung der Luftqualität sowie eine Erhöhung der Lebens- und Wohnqualität in den Städten zu nennen (Wuppertal Institut, 2020, 19).

Im **Gebäudebereich** ist die aktuelle Sanierungsrate in Gebäudebeständen von 1% p.a. als deutlich zu niedrig zu anzusehen. Zudem ist eine Abdeckung der Heiz- und Warmwasserbedarfe in Häusern durch Erneuerbare Energien ebenfalls als obligatorische Vorgabe einzustufen. Als **wichtigste Maßnahmen** in diesem Sektor werden genannt (Prognos et al., 2020, 20; Wuppertal Institut, 2020, 19):

- Erhöhung der energetischen Sanierung auf 4% p.a. (Bundesregierung: 2% p.a.),
- Erhöhung der Effizienzstandards,
- Ersatz fossiler Energieträger im Haus durch Wärmepumpen (Zielgröße: mindestens 6 Mio. eingebaute Wärmepumpen bis 2030) und solarthermische Anlagen,
- Dekarbonisierung von Nah- und Fernwärme,
- Bereitstellung synthetischer Brennstoffe, etwa für Rest-Energiepotenziale,
- umfassende Dämmungsprogramme,
- Verbot des Einbaus von Öl- und Erdgasheizungen nach 2025.

Übergeordnet müssen eine Effizienzindustrie, die energetische Sanierung und die Fertigung von Wärmepumpen auf eine industrielle Basis gehoben werden, auch unter Ausnutzung hoher Kostenreduktions- und Skalierungspotenziale mittels serieller, automatisierter Fertigungsanlagen (Prognos et al., 2020, 13).

Da der aktuelle Wärmebedarf für Wohn- und Nichtwohngebäude durch synthetische Brennstoffe (Umwandlungsverluste) oder biogene Kraftstoffe (Flächenkonkurrenz) sowie solare Wärme (Flächenkonkurrenz mit PV) nicht zu decken ist, muss ein umfassendes und konsequentes Anreizsystem für energetische Sanierungen mit bundesweit flächendeckender Sanierungssteuerung geschaffen werden (Wuppertal Institut, 2020, 19). Auch den Trend zu immer größeren Wohnungen gilt es zu hinterfragen und über neue Anreizsysteme zu steuern (ebd.).

Die ebenfalls von entsprechenden Förderprogrammen unterstützten Sanierungsmaßnahmen für Gebäudeflächen müssen bis 2050 zu 90% abgeschlossen und eine weitgehende CO<sub>2</sub>-Neutralität bei Gebäuden durch eine großflächige Fernwärmeversorgung sowie insgesamt rund 14 Mio. installierte Wärmepumpen sichergestellt sein (Prognos et al., 2020, 22).

Auch eine Dekarbonisierung des – in der Wuppertal-Studie (Wuppertal Institut, 2020, 10 & 12) nicht näher betrachteten – **Landwirtschaftssektors** ist, wenngleich in vergleichsweise begrenztem Maße, möglich. Die **wichtigsten Maßnahmen** sind wie folgt (Prognos et al., 2020, 20ff.):

- Vorantreiben technischer Minderungsmaßnahmen (Vergärung von Wirtschaftsdüngern, verbesserte Lagerung und Einsatz von emissionsarmen Ausbringungstechnologien für Mist und Gülle etc.),
- Änderungen der landwirtschaftlichen Produktion (Ausweitung des Ökolandbaus, Umstellung auf Kulturarten mit geringerem Stickstoffbedarf, Reduktion der Tierbestände, nachfrageseitige Änderungen),
- Umbau der Tierbestände und die Vergärung hoher Wirtschaftsdüngeranteile in Biogasanlagen sowie
- Erschließung kleinerer THG-Minderungspotenziale durch den Anbau weniger stickstoffintensiver Kulturen und angepasster Nutzung von Moorflächen.

Eine zentrale Bedeutung kommt insbesondere gegen Ende des Ziel-Zeitraums der Landwirtschaft sowie der Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) zu, die insbesondere folgende Fragen aufwirft: Wie werden verbleibende THG-Emissionen kompensiert, wie stellt sich die Rolle der strategischen Ressource Biomasse dar und wie signifikant ist die Rolle natürlicher CO<sub>2</sub>-Senken? (Prognos et al., 2020, 160).

Maßnahmen im **Abfallbereich** umfassen im Wesentlichen eine weitere Senkung der Methanemissionen durch eine Ausweitung der Maßnahmen zur Deponiebelüftung. Ansonsten bestehen nur geringe THG-Reduktionspotenziale, insbesondere im Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen. Daher müssen, auch auf längere Sicht, unvermeidbare Restemissionen aus der Deponierung, der biologischen Behandlung und dem Abwasserbereich kompensiert werden (Prognos et al., 2020, 21f.).

***Fazit:** Eine Steigerung des Klimaziels für 2030 – als zentrale Voraussetzung zur Erreichung der längerfristigen Klimaziele bis 2050 – bedeutet eine deutliche Beschleunigung der Energie-, Verkehrs- und Wärmewende, darunter ein vollständiger Kohleausstieg bis 2030, ein Erneuerbaren-Anteil am Strom von etwa 70%, 14 Millionen Elektroautos, 6 Millionen Wärmepumpen, eine Erhöhung der Sanierungsrate um mindestens 50% sowie die Nutzung von gut 60 TWh „grünen“ Wasserstoffs (Prognos et al., 12).*

*Deutschland kann auf Basis konsequenter Anwendung vorhandener oder weit entwickelter Technologien sowie mit einer vorausschauenden Politik bis 2050 klimaneutral werden und zugleich auf internationalen Zukunftsmärkten „vor die Welle kommen“, und zwar in langfristig robuster Weise, wenn entscheidende Reduktionsschritte bis 2030 umgesetzt werden (Prognos et al., 2020, 13f. und 159). Die Markt- und Wertschöpfungsanteile der deutschen Industrie an transformativen Technologie- bzw. Emissionsminderungsoptionen hängen vom Ausmaß des Hochlaufs dieser Optionen ab, welche wiederum von der Schnelligkeit der Schaffung der dafür notwendigen Voraussetzungen – etwa in Bezug auf den Ausbaustand der regenerativen Stromerzeugung, erforderliche Infrastrukturen, etc. – abhängen (Prognos et al., 160). Im Ergebnis ist Deutschlands Strom- und Verkehrsinfrastruktur bis 2050 erneuert, das Land verfügt über eine zukunftsfähige Wasserstoffindustrie, einen modernen Gebäudebestand sowie eine Industrie, die in den Zukunftstechnologien im globalen Wettbewerb vorne mitspielt (Prognos et al., 2020, 12).*

## 2.2.2 SEKTORÜBERGREIFENDE MASSNAHMEN

In beiden Studien spielen das Volumen und die Geschwindigkeit der in den 2020er Jahren einzuleitenden und umzusetzenden klimapolitischen Maßnahmen eine entscheidende Rolle. Dies gilt nicht zuletzt auch im Hinblick auf eine Modernisierung in Richtung Resilienz und Zukunftsfähigkeit sowie einen inklusiven Strukturwandel (Wuppertal Institut, 2020, 10f. und 16; Prognos et al., 2020, 13, 16 und 19). Der größte Dekarbonisierungsbeitrag ist demnach bis 2030 durch den Energiewirtschaftssektor zu leisten (77 Mt CO<sub>2</sub>eq), gefolgt von der Industrie (17 Mt CO<sub>2</sub>eq) sowie dem Verkehrs- und Gebäudesektor (je 5 Mt CO<sub>2</sub>eq) (Prognos et al., 2020, 19).

Als **tragende Säulen** für diese umfassende und sektorübergreifende Transformation von Staat, Wirtschaft und Gesellschaft sind in erster Linie zu nennen (Prognos et al., 12 und 24-30):

- **Energieeffizienz und Senkung des Energiebedarfs:**
  - Halbierung des Primärenergieverbrauchs durch Effizienzsteigerungen und Senkungen beim Endenergieverbrauch: Stellschrauben sind v.a. umfassende Gebäudesanierungen, effiziente Beleuchtung, verbrauchsarme Geräte, deutliche Effizienzgewinne im Verkehrssektor mittels zunehmender Elektrifizierung sowie ein flächendeckender Einsatz von Wärmepumpen zur signifikanten Senkung des Brennstoffeinsatzes beim Heizen und für die Warmwasserbereitung.
  - Effizienzgewinne durch Rückgang (fossiler) thermischer Energieumwandlungsverfahren, mit starker Senkung des Brennstoffeinsatzes, vollständige Transformation der Energieträgerstruktur bis 2050.
- **Erneuerbare Stromerzeugung und Elektrifizierung:**
  - Erheblicher Bedeutungszuwachs von – bis 2050 vollständig klimaneutral zu erzeugendem – Strom als Energieträger, der für zahlreiche Endanwendungen effizient eingesetzt werden kann (angenommener Stromverbrauch für 2050: rd. 960 TWh, also rd. 370 TWh höher als heute. Die Löwenanteile dieser Anstiege entfallen mit 160 TWh auf den Verkehr, 130 TWh auf die Wasserstoffherstellung und 70 TWh auf die Industrie, bei zugleich rückläufigem Stromverbrauch im Gebäudebereich (Prognos et al., 2020, 25)).
  - Ausgleich kurzfristig schwankender Strombedarfe über (Batterie-) Speicher, Lastmanagement und den Stromhandel, saisonaler Ausgleich v.a. über Erzeugung und Rückverstromung von Wasserstoff sowie die Nutzung von Speicherkraftwerken.
- **Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff:**
  - Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft für Industrie, Energiewirtschaft, Luft- und Seeverkehr. Haupteinsatzgebiete in der Industrie: Direktreduktionen bei Stahlherstellung, Grundstoffchemie, Prozessdampferzeugung, im Verkehr: Schwerlastverkehr. Wasserstoff soll v.a. Residualnachfrage abdecken und dient ansonsten der Stromerzeugung in ehemaligen Gaskraftwerken und für die Kraft-Wärme-Kopplung. Aus Kostengründen keine Nutzung für die Objektbeheizung.
  - Aufbau einer Produktions- und Versorgungsstruktur für synthetische Energieträger: Power-to-Liquid (PtL)-Kraftstoffe im internationalen Luft- und Seeverkehr und in der Industrie.
  - Für beide Bereiche müssen übergeordnet Kostensenkungen erzielt sowie technische und regulative Strukturen für den Import klimaneutral und nachhaltig bereitgestellten Wasserstoffs und synthetischer Kraftstoffen geschaffen werden (Prognos et al., 2020, 159f.).

- **Darüber hinaus sind weitere sektorübergreifende Themen als wichtige Handlungsfelder hervorzuheben (Prognos et al., 159):**
  - Aufkommen und Verwendung von Biomasse betrifft auch die bestehenden Strukturen in Land- und Forstwirtschaft, auch im Hinblick auf Klimaschutz und Nachhaltigkeitsfragen. Die künftigen Nutzungsstrukturen für Biomasse müssen aus einer langfristig strategischen Perspektive heraus adressiert werden (Verstromung, technische Senken, CCS-Kreisläufe, etc.). Außerdem fungiert der Industrierohstoff Biomasse als Treiber für eine Dekarbonisierung. Daher ist eine Zusammenführung dieser Möglichkeiten und Anforderungen in einer konsistenten Biomassestrategie erforderlich.
  - Kreislaufprozesse für Kohlenstoff als auch zahlreiche andere Stoffe, v.a. in Energiewirtschaft und Industrieprozessen, sind für die Erzielung einer Netto-Null-Emissionsbilanz unerlässlich. Die Schaffung branchenübergreifender Kreislaufprozesse und entsprechender regulativer Marktarrangements bedürfen einer übergreifenden strategischen Steuerung.

Jenseits aller notwendigen Anstrengungen zu einer zu priorisierenden Vermeidung klimaschädlicher Emissionen ist eine Kompensation residualer THG-Emissionen – die in Deutschland insbesondere in den Bereichen Industrie, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft verbleiben (rund 62 Mt CO<sub>2</sub>eq oder rund 5% der THG-Emissionen des Jahres 1990) – mithilfe technischer oder naturbasierter Verfahren erforderlich. Die daraus entstehenden Reststoffe müssen zudem durch ein verbessertes Recyclingsystem dauerhaft im Stoffkreislauf gehalten werden (Prognos et al., 2020, 23).

Die Kohlenstoffabscheidung und -lagerung („Carbon Capture and Storage“, CCS) wird eine zwar begrenzte, aber dennoch unverzichtbare Rolle zur Herstellung einer THG-Neutralität spielen müssen. Hierbei stellen sich infrastrukturelle und räumliche Fragen. Wichtige Voraussetzung für den Erfolg von CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien ist eine Erzielung massiver Lernkurveneffekte in Bezug auf diese Technologien. (Prognos et al., 2020, 159). Auch eine gesellschaftliche Akzeptanz gilt übergeordnet als „Kernkriterium“ (Prognos et al., 2020, 3 und 119).

Wichtig ist eine offene Diskussion in den nächsten Jahren über diesen letzten essenziellen Schritt hin zur Klimaneutralität. Dazu zählt u.a. auch eine Formulierung einer CCS-Strategie, eine Diskussion zu CO<sub>2</sub>-Transportrouten innerhalb Deutschlands und zu möglichen CO<sub>2</sub>-Lagerstätten (Wuppertal Institut, 2020, 17).

Notwendige klimaschonende Technologien bedürfen großer Forschungs- und Entwicklungs (FuE)-Anstrengungen, auch in Form von Demonstrations- und Pilotanlagen, sowie im Anschluss daran eine schnelle Markteinführung und ein großflächiges Ausrollen. Die Diskussionen darüber sind nicht neu, eine Umsetzung aber aufgrund vieler Umstände gehemmt. Der Dialog mit den betreffenden Unternehmen über eine Hemmnis-Beseitigung muss umgehend beginnen (Wuppertal Institut, 2020, 17).

Die zentrale Aufgabe für Politik und Unternehmen in den 2020er Jahren liegt daher in der Transformation „fossiler“ Geschäftsmodelle mit konstant sinkenden Marktanteilen und der umfassenden Einstellung auf globale Entwicklungstrends. (Prognos et al., 2020, 10).

Eine Politik, die sich an Pariser Klimazielen orientiert, schafft zudem unternehmerische Investitionssicherheit: So lange die eigene Unternehmensstrategie sich nicht auf eine Klimaneutralität vor 2050 ausrichtet und konsistent mit dem Pariser Abkommen ist, werden Geschäftsmodelle mittel- und langfristig nicht mehr tragfähig sein. (Prognos et al., 2020, 14).

Der Fokus auf dem Weg zur Klimaneutralität sollte nicht zuletzt auch auf die Chancen gerichtet sein, denn eine Transformation mit einer starken Dekarbonisierungs-Komponente schafft Wirtschaftskraft und Arbeitsplätze: Es ist Aufgabe von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, vor diesem Strukturwandel nicht die Augen zu verschließen oder zu versuchen, ihn zu verlangsamen (Prognos et al., 2020, 14). Für eine im weltweiten Maßstab bedeutende Exportnation wie Deutschland gilt umso mehr in einem möglichen globalen Szenario unter dem Vorzeichen „Wettbewerb um Klimaneutralität“.

*Fazit: Für das Gelingen dieser Transformation ist eine Vielzahl von Werkzeugen erforderlich, die jeweils adäquater Lösungsansätze bedürfen. Der CO<sub>2</sub>-Preis ist dabei lediglich ein wichtiges Instrument. Um zentrale Infrastrukturen zu etablieren, müssen beträchtliche Anfangsinvestitionen geleistet werden (Wuppertal Institut, 2020, 17). Hierzu gehört bis 2050 unter anderem eine sektorenübergreifende Elektrifizierung wesentlicher Bereiche bis 2050. Wasserstoff und klimafreundliche synthetische Treibstoffe gewinnen als Sekundärenergieträger und Rohstoff eine zunehmende Bedeutung. Auch Effizienzverbesserungen und ein erhöhter Einsatz von Biomasse – auch in der Industrie – müssen für Emissionsreduktionen unbedingt genutzt werden (Prognos et al., 2020, 21).*

*Wichtig für ein Gelingen der großen Transformation ist die gesellschaftliche Bereitschaft zu massiven Veränderungen (Akzeptanz, Verhaltensänderungen), ein außerordentlicher politischer Gestaltungswille, mithin ein steuerndes Eingreifen über die gesamte Transformation hinweg und die Schaffung verlässlicher Rahmenbedingungen für die Wirtschaft, mit einer Fokussierung auf die Umsetzung. Die Gestaltung entscheidender Strukturveränderungen muss proaktiv angegangen werden, Chancen und mögliche Risiken müssen gleichermaßen adressiert sowie Rahmenbedingungen für eine verstärkte internationale Zusammenarbeit geschaffen werden (Wuppertal Institut, 2020, 11). Zur Gewährleistung einer gesellschaftlichen Akzeptanz muss diese Transformation sozioökonomisch ausgewogen ausgestaltet werden und durch partizipative Elemente begleitet werden. Zudem bedürfen die aufgrund erhöhter Klimaziele entstehenden Wettbewerbsnachteile entsprechender Ausgleichsmaßnahmen (Prognos et al., 2020, 13f.).*

## 2.2.3 ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG ZU DEN BEIDEN SYNTHETISIERTEN STUDIEN

Abschließend werden in diesem Abschnitt zentrale Aspekte der betrachteten Studien gegenübergestellt und zusammenfassend bewertet.

Tabelle 1 Vergleich: Die wichtigsten Parameter und Ergebnisse aus der Synthese der Studien 1 (Wuppertal Institut, 2020) und 2 (Prognos et al., 2020).

Parameter	Ergebnisse aus Studie 1: Wuppertal Institut, 2020	Ergebnisse aus Studie 2: Prognos et al., 2020
Ziel CO <sub>2</sub> - oder Klimaneutralität?	CO <sub>2</sub> -Neutralität	Klimaneutralität
Zieljahr für eine CO <sub>2</sub> - bzw. Klimaneutralität	2035	2050
Definition eines CO <sub>2</sub> -Budgets	ja	nein
Explizites Bekenntnis zum 1,5°C-Ziel	ja	nein
Hauptfaktoren für diese Zielerreichung im Vergleich zum Klimaschutzplan 2050 der BReg	Deutlich erhöhte Umsetzungsgeschwindigkeit (Maßnahmen), smarte Technologieauswahl, erhebliche Effizienzsteigerungen, durchgängige Etablierung einer Kreislaufwirtschaft, Suffizienzstrategien und veränderte Konsummuster	Erhöhte Umsetzungsgeschwindigkeit (Maßnahmen), smarte Technologieauswahl, erhebliche Effizienzsteigerungen, durchgängige Etablierung einer Kreislaufwirtschaft, moderates Wirtschaftswachstum, moderat veränderte Konsummuster
Einbeziehung von CDR-Technologien	ja, teilweise (Industrie)	ja, unbedingt
Szenarientwicklung und -konsistenz (Anspruch)	nein	ja
Reduktionspfade nach Sektoren	teilweise	ja, durchgängig
Cross-sektorale Handlungsfelder	ja	ja
Orientierung der Transformationsschritte an Investitionszyklen	ja, soweit möglich	ja, unbedingt
Einzelmaßnahmen benannt	teilweise	sehr detailliert
Rolle der Beteiligung vieler Akteure / Gesellschaft	hoch	hoch

Die beiden synthetisierten Studien liefern wichtige Denkanstöße für eine umfassende strukturelle Transformation mit Dekarbonisierungspfaden auf Basis unterschiedlicher Umsetzungsgeschwindigkeiten.

Als Gemeinsamkeiten bei beiden Studien sind vor allem die Handlungsempfehlungen, abzielend auf einen deutlich ambitionierteren Ausbau Erneuerbarer Energien, einer signifikanten Erhöhung von Energieeffizienzen und einer smarten Technologieauswahl zu nennen. Außerdem wird gleichermaßen eine – angesichts sehr knapper Fristen – vorrangige Nutzung bereits vorhandener Technologien und die Etablierung einer möglichst vollständigen Kreislaufwirtschaft in allen Sektoren sowie sektorübergreifend empfohlen. Schließlich wird perspektivisch ganz oder teilweise der Einsatz von CO<sub>2</sub>-entziehenden Technologien – in erster Linie zur Kompensation von Residualemissionen und dezidiert nicht zur allgemeinen THG-Reduktion – vorausgesetzt.

Aus der anderen Seite sind auch einige teils signifikante Unterschiede hinsichtlich Resultaten und Fazit zwischen beiden Studien festzustellen. So liefert die **Wuppertal-Studie (Wuppertal Institut, 2020)** zwar kein

in sich konsistentes Dekarbonisierungsszenario (Wuppertal Institut, 2020, 10), legt aber seinen Denkanstößen das Ziel einer maximalen Erderwärmung von 1,5°C gegenüber der vorindustriellen Zeit sowie ein sich daran orientierendes CO<sub>2</sub>-Budget für Deutschland zugrunde. Die daraus resultierende Kalkulation eines deutschen CO<sub>2</sub>-Restbudgets führt in der Folge zu durchaus ambitionierten Zielmarken (etwa eine CO<sub>2</sub>-Neutralität bis 2035) und daraus abgeleiteten überaus ehrgeizigen Einzelmaßnahmen in den jeweiligen Sektoren, die die Frage nach einer nachvollziehbaren Machbarkeit aufwirft und diskutieren lässt. Zentral wichtige Voraussetzung für diese Machbarkeit wäre eine gesellschaftliche Umsetzbarkeit unter Beachtung sozialer Aspekte, die nicht zuletzt auch eine Betrachtung und Einbeziehung zahlreicher sozialökonomischer und politischer Einflussfaktoren bedingt. In diesen Kontext fällt auch das Fehlen einer makroökonomischen Analyse in dieser Studie, welche in der zweiten Studie (Prognos et al., 2020) anhand der präsentierten Transformationsszenarien als zumindest konsistent angedacht bzw. zugrunde gelegt wurde.

Kritisch anzumerken ist die in der Wuppertal-Studie fehlende Einbeziehung nicht-CO<sub>2</sub>-neutraler Infrastrukturen, deren Schaffung bei jeder Dekarbonisierungsstrategie vorausgesetzt werden muss (z.B. erforderlicher Rohstoff- und Energieaufwand zur Produktion klimafreundlicher Kraftwerke und Antriebe). Diese sollte ebenso adressiert werden wie mögliche Rebound-Effekte im Zuge bzw. infolge der Erhöhung von Energieeffizienzen (etwa höhere Nutzungsintensitäten, die CO<sub>2</sub>-Emissionen wiederum erhöhen). Da bei Fokussierung auf die Effekte, die unmittelbar in Deutschland induziert werden, nur ein Teil des ökologischen Fußabdruckes erfasst wird, wären die Systemgrenzen entsprechend zu erweitern, so dass auch Effekte, die indirekt in anderen Ländern durch Aktivitäten in Deutschland entstehen, mitberücksichtigt werden können.

Als besondere Leistung der Wuppertal-Studie ist die darin aufgeworfene Frage nach Suffizienzstrategien zu nennen, einschließlich umfassender und an Nachhaltigkeitszielen orientierter Verhaltensänderungen, als möglicher Alternativentwurf zu einem zwangsläufigen und nicht notwendigerweise klimafreundlichen Weltwirtschaftswachstum, das letzten Endes auch einem übergeordneten Klimaziel „Netto Null“ entgegenstehen dürfte.

Zudem wird in der Wuppertal-Studie dezidiert auf die Bedeutung der gesellschaftlichen Akzeptanz für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende hingewiesen. Betont wird, dass insbesondere in Bereichen Verkehr, Ausbau von Erneuerbaren-Energie-Anlagen und Energieinfrastrukturen eine Akzeptanz für erforderliche Verhaltensänderungen nicht einfach herzustellen ist bzw. Akzeptanz durch zusätzlich Maßnahmen zu sichern ist (Wuppertal Institut, 2020).

Eine Orientierung an einer maximalen Erderwärmungsschwelle und einem verbleibenden CO<sub>2</sub>-Budget für Deutschland fehlt zwar in der **zweiten für diese Synthese herangezogenen Studie (Prognos et al., 2020)**, es wurde aber ein dreistufiges Dekarbonisierungsszenario bis 2050 mit teils sehr detaillierten Einzelmaßnahmen entworfen, ebenfalls sektoral und sektorübergreifend. Dieses orientiert sich insbesondere an Kriterien von Kosten, Wirtschaftlichkeit, technologischer und markttechnischer Umsetzbarkeit sowie Innovations- und Erneuerungszyklen, mit einem besonderen Fokus auf Technologien mit einem geringen technologischen und ökonomischen Risikoprofil. Zudem wählt diese einer Machbarkeitsstudie nahekommende Untersuchung in puncto Stromerzeugung und -verteilung einen gesamteuropäischen Ansatz, was jedoch die Frage nach den entsprechenden Dekarbonisierungspfaden in den benachbarten europäischen Partnerländern impliziert.

Schließlich setzen die in dieser Studie zugrunde gelegten Ansätze ein durchschnittliches jährliches Wirtschaftswachstum von 1,3% und lediglich moderate Verhaltensänderungen (Wohnflächen, Mobilität, Konsummuster, Ernährungsgewohnheiten, etc.) voraus (Prognos et al., 2020, 10f. und 15).

Die in der Wuppertal-Studie (Wuppertal Institut, 2020) durchaus diskutierten Suffizienzstrategien fehlen daher in der zweiten, von Prognos et al. (2020) erstellten Klimaneutralitätsstudie. Somit fehlen darin neben einer Adressierung potentieller Rebound-Effekte auch eine Diskussion über mögliche Postwachstumsstrategien, die auch einen grundlegenden und zugleich sozioökonomisch tragfähigen Wertewandel sowie Verhaltensänderungen einschließen könnten. Entsprechend wurden in der Studie von Prognos et al. (2020) die Wirkungen möglicher (zusätzlicher) Anpassungen der industriellen Produktionsniveaus nicht problematisiert.

Darüber hinaus geht der von Prognos et al. gewählte Ansatz von einem perspektivisch hohen Volumen erneuerbarer Energieimporte, wie etwa Wasserstoff, aus, was mit Blick auf infrastrukturelle und politische Risiken sowie übergeordnete Nachhaltigkeitsziele mindestens diskussionswürdig ist. So erfordert die Erzeugung von Wasserstoff in sonnenreichen, aber auch ariden Gebieten der Erde (etwa Marokko oder Saudi-Arabien) einen hohen Einsatz der u.U. vor Ort besonders knappen Ressource Wasser, sowohl zur Kühlung als auch zur Produktion von Wasserstoff. Es gilt also in dieser Hinsicht ein ausgewogenes und zugleich konsistentes Chancen-Risiko-Profil zu definieren, auch vor dem Hintergrund einer bereits durch die Bundesregierung entwickelten und 2020 vorgestellten Wasserstoffstrategie (BMW, 2020) und nicht zuletzt der umfassenden wie vielschichtigen UN-Nachhaltigkeitsziele.

Insgesamt liefern beide Studien überaus wertvolle Denkanstöße sowie teils sehr konkret auf Sektoren und Zeitschienen heruntergebrochene und ausformulierte Handlungspfade zur Erreichung einer CO<sub>2</sub>- bzw. Klimaneutralität in Deutschland, mit verschiedenen Ansätzen und im Ergebnis unterschiedlichen Zieljahren. Insbesondere die daraus resultierenden THG-Reduktionsschritte und -volumina unterscheiden sich durchaus beträchtlich von den bislang in der deutschen Klimapolitik festgesetzten Zielgrößen und Zeithorizonten. Diese dürfen, ja müssen im Hinblick auf ein rasch schwindendes CO<sub>2</sub>-Restbudget vor allem unter den Aspekten der aufgrund anhaltender Umsetzungsverzögerungen und bestehender Lock-In-Effekte notwendigen kontinuierlichen Erhöhung von Klimazielvorgaben sowie entlang übergeordneter sozioökonomischer Machbarkeiten diskutiert werden. Hierbei ist zu unterstreichen, dass sich die Ziele allein mit technologischen Fortschritt nicht werden erreichen lassen. Vielmehr ist es zwingend erforderlich, Akteure bzw. Akteursgruppen mit ihren jeweiligen Interessen mitzunehmen und entsprechende Handlungsoptionen zu entwickeln.

Ein rascher und möglichst vollständiger Abbau klimaschädlicher Subventionen auf allen Ebenen dürfte einer Erreichung des übergeordneten Klimaneutralitätsziels mitnichten im Wege stehen, ganz im Gegenteil.

### 3 WEITERE RELEVANTE STUDIEN UND WICHTIGE ASPEKTE IM HINBLICK AUF DIE TRANSFORMATION

#### 3.1 UNWÄGBARKEITEN UND RISIKEN: BEISPIEL WASSERSTOFF

Gemäß Berechnungsansätzen aus den beiden betrachteten Studien bewegt sich perspektivisch – also bis 2050 – der nationale Bedarf an klimafreundlich erzeugtem Wasserstoff (H<sub>2</sub>) in einem Volumen, das seinen, auch kostenbedingten, Einsatz auf eng begrenzte Residualnachfragen (Energie: Kraft-Wärme-Kopplung, ehemalige Gaskraftwerke; Industrie: Direktreduktionen bei Stahlherstellung, Grundstoffchemie, Prozessdampf-erzeugung; Verkehr: Schwerlastverkehr, Schifffahrt und Luftverkehr) limitiert (Prognos et al., 2020, 27). Darüber hinaus wäre ohne nennenswerten H<sub>2</sub>-Import ein jährlicher Zubau von 40 GW Erneuerbarer Energien erforderlich, etwa auf Basis von Windkraft, PV-Zubau und internationale Energie-Patenschaften (Wuppertal Institut, 2020, 14).

Laut der Wuppertal-Studie beläuft sich der jährliche Bedarf an klimaneutralen Energieträgern (H<sub>2</sub>, etc.) in einem klimaneutralen System zwischen 400 und 900 TWh (Wuppertal Institut, 2020, 15). Generell erscheint der H<sub>2</sub>-Import allerdings nur aus jenen Ländern als sinnvoll, deren Eigenbedarf bereits gedeckt ist. Für die Bereitstellung von 150 bis 200 TWh aus H<sub>2</sub> werden Elektrolyseure im Kapazitätsumfang von 40 bis 90 GW benötigt, wohingegen der Plan der Bundesregierung bis 2035 lediglich einen Kapazitätsumfang von 10 GW vorsieht (Wuppertal Institut, 2020, 15).

Hinsichtlich der Diskussion um eine Technologieoffenheit in Bezug auf klimafreundliche Antriebe und die tatsächliche Weiterentwicklung CO<sub>2</sub>-armer Anwendungen in den verschiedensten Sektoren und Branchen – auch mit Blick auf ihre Machbarkeit und deren Grenzen im nationalen und globalen Maßstab – sind mit diesen beiden Studien wertvolle Denkpulse geliefert worden, die aber sicherlich noch weiterer Analysen bedürfen.

Auch mit Blick auf die in der Deutschen Wasserstoffstrategie 2020 (BMWi, 2020) verankerten Ziele und Zeitstrahlen ist es erforderlich, die technologische und politische Umsetzbarkeit unter dem Aspekt der Erreichung zentraler Klimaziele immer auch in den Kontext vielfältiger globaler Interdependenzen, Risiken und Unsicherheiten zu stellen. Zudem gilt es bei allen für die nationale Ebene zu durchdenkenden Lösungsansätzen die übergeordneten globalen Nachhaltigkeitsziele nicht aus dem Auge zu verlieren.

#### 3.2 UNWÄGBARKEITEN UND RISIKEN: BEISPIEL INTERNATIONALER ENERGIE-CHARTA-VERTRAG (ECT)

Der im Dezember 1991 in Den Haag vereinbarte, im Dezember 1994 in Lissabon – auch mit der Unterschrift der meisten EU-Staaten einschließlich Deutschlands – geschlossene und im April 1998 in Kraft getretene Internationale Energiecharta-Vertrag (engl. „Energy Charter Treaty“, ECT, Energy Charter, o.J.) bezweckt laut Art. 3 die Erleichterung des Zugangs für Primärenergieträger und Energieerzeugnisse zu den internationalen Märkten unter marktüblichen Bedingungen sowie übergeordnet die Entwicklung eines offenen und wettbewerblichen Marktes (Energy Charter, o.J., Art. 3). Dieses umfasst neben einer Festlegung nicht-diskriminierender Schutzbedingungen für Investoren in diesem Bereich (Energy Charter, o.J., Art. 5 bis 7) auch einen umfassenden und langjährigen Investitionsschutz für Unternehmen und andere Akteure, die in den jeweiligen einzelnen Unterzeichnerstaaten in diesem Sektor investieren (Energy Charter, o.J., Art. 10).

Neben den damit verbundenen Entschädigungs-, Enteignungs-, Kapital- und Rechtsverkehrsregelungen (Energy Charter, o.J., Art. 12 bis 15) erscheinen aus langfristiger klimapolitischer Perspektive insbesondere die Vertragsbestimmungen zur Beilegung von Streitigkeiten zwischen einem Investor und einer Vertragspartei (Energy Charter, o.J., Art. 26 bis 28) – beispielsweise auch einer Gebietskörperschaft oder einer staatlichen Instanz – relevant und im Klagefall rechtlich-politisch durchaus herausfordernd. Dies gilt selbst im Falle der Kündigung des Abkommens durch einen Vertragsstaat, wie etwa im Falle Italiens 2015: Denn aus den bis zum Austrittszeitpunkt eingegangenen Verpflichtungen durch bislang auf Basis des ECT geschlossenen Verträgen können noch Ansprüche und gegebenenfalls Klagen von Investorensseite zu Lasten des Vertragspartners für weitere 20 Jahre erwachsen (Energy Charter, o.J., Art. 47 und Global Arbitration News, 2015).

Diese, losgelöst von nationalen oder europäischen Rechtswegen und Klageinstanzen, durch den ECT auf die Ebene internationaler Schiedsgerichte angesiedelte Möglichkeit eines auch materiell durchsetzbaren Rechtsanspruchs im Rahmen eines nicht-öffentlichen Schiedsgerichtsverfahrens wurde bereits im Jahre 2009 durch den Wissenschaftlichen Dienst des Deutschen Bundestages adressiert: Das Beispiel der Klage des Energiekonzerns Vattenfall gegen die Bundesrepublik in Sachen Inbetriebnahme seines neu errichteten Kohlekraftwerks in Hamburg-Moorburg und daraus folgender möglicher Entschädigungsleistungen zu Lasten des Staates im Falle der Verweigerung einer Betriebsgenehmigung durch die Freie und Hansestadt Hamburg (Deutscher Bundestag, 2009, Kap. 8.3, 19ff.) sei hier beispielhaft angeführt. Der ECT bietet somit auch einen rechtlichen Schutz für die Betreiber fossiler Kraftwerke.

Eine ECT-Modernisierung ist, nicht zuletzt mit Blick auf das Pariser Klimaabkommen und den sich aus den im Rahmen des „European Green Deal“ ergebenden Verschärfungen der Klimaschutzziele (Europäische Kommission, 2020b und Europäische Kommission, o.J.), inzwischen Gegenstand einer lebhaften Diskussion auf europäischer Ebene (European Commission, 2020a). Auch mit Blick auf die Rolle internationaler Schiedsgerichte, die rechtlichen Folgen internationaler Schiedsgerichtsverfahren, einer staatsrechtlich mindestens diskussionswürdigen Gemengelage in diesem Kontext und nicht zuletzt ihrer klimapolitisch überaus kontraproduktiven Wirkungen wächst auch von Seiten der Wissenschaft die Kritik an Form und Struktur dieser Internationalen Investitionsschutzabkommen insgesamt, wobei der ECT eine zentrale Rolle einnimmt (EndFossilProtection, 2020 und Der Standard, 2020).

Auch auf diesem Gebiet sind somit rasch Handlungsoptionen zu prüfen, die alternative Vorgehensweisen im Sinne eines mit den neuen Klimazielen konsistenten internationalen Rechtsrahmens und Regelwerkes einschließen.

### 3.3 ABBAU KLIMASCHÄDLICHER SUBVENTIONEN

Eine weitere, ebenso 2020 erschienene Studie, die in diesem Kontext als relevante Quelle herangezogen und exzerpiert wurde, fokussiert sich auf jene direkten und indirekten Subventionen in Deutschland, die aufgrund ihrer Begünstigung oder Förderung fossiler Strukturen und klimaschädlicher Verhaltensweisen den Zielen einer ökologischen, auf eine Klimaneutralität abzielenden Transformation diametral entgegenstehen (Beermann et al., 2020).

Das auch in der Wissenschaft bereits vielfach diskutierte Junktim zwischen Pandemie-bedingten Aufbauhilfen und den auch finanziellen Erfordernissen für die Bewältigung einer ökologischen Transformation legt nahe, dass freiwerdende Mittel aus einem Abbau klimaschädlicher Subventionen u.a. auch zur Entlastung öffentlicher Haushalte eingesetzt bzw. umgewidmet werden könnten bzw. sollten.

Gemäß zugrundeliegenden Studienergebnissen beläuft sich das jährliche Volumen der zehn wichtigsten klimaschädlichen Subventionen – unter den Hauptaspekten Klimaschutzwirkung und Generierung finanzieller Einnahmen – auf anfänglich rd. 46 Mrd. € (ohne Lenkungswirkung) an Subventionen und rd. 100 Mt CO<sub>2</sub>eq an THG-Emissionen (Beermann et al., 2020, 4). Aus der Kombination aus Klimapotenzial und fiskalisches Einsparpotenzial (= Reformpotenzial in eingesparten Emissionen je 1 Mio. zusätzlicher Einnahmen) ergibt sich gemäß Bewertungsmatrix in dieser Studie folgendes Ranking hinsichtlich der Dringlichkeit des Subventionsabbaus (ebd.):

- Energiesteuerbefreiung Kerosin
- Strompreisausnahmen Industrie
- Energiesteuerbegünstigung für die Stromerzeugung
- Entfernungspauschale
- Mehrwertsteuerbefreiung für internationale Flüge
- Reduzierter Mehrwertsteuersatz für tierische Produkte
- Energiesteuervergünstigung Diesel (Dieselprivileg)
- Steuervorteile Dienstwagen (Dienstwagenprivileg)
- Energiesteuervergünstigungen Industrie
- Steuerbegünstigung Agrardiesel

Mit dem sukzessiven Subventionsabbau wird ein Signal zur Abkehr von fossilen Energien und für eine beschleunigte ökologische Transformation mit einem Energiesystem auf Basis Erneuerbarer Energien gesetzt. Dieser Subventionsabbau wäre schließlich konsistent mit dem Deutschen Klimagesetz, dem „European Green Deal“ und dem Pariser Klimaschutzabkommen (Beermann et al., 2020, 5). Darüber hinaus dürften Verteilungswirkungen der Subventionen für politische Reformen und die gesellschaftliche Akzeptanz eine bedeutende Rolle spielen (Beermann et al., 2020, 18).

## 4 ZUSAMMENFASSENDES FAZIT

Sowohl die beiden synthetisierten Studien zur Klima- bzw. CO<sub>2</sub>-Neutralität als auch die schlaglichtartig beleuchten und rasch zu adressierenden Haupthindernisse auf dem Weg dorthin zeigen, dass eine Transformation hin zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland in allen Bereichen zwar überaus anspruchsvoll, aber grundsätzlich möglich ist. Dies gilt umso mehr für jene in sich konsistenten Ansätze, die auch unter sozioökonomischen Kriterien als langfristig tragfähig und machbar erscheinen. In diesem Kontext sei nicht zuletzt auf die großen ökonomischen Chancen des weltweit sehr bedeutenden Exportlandes Deutschland unter Nutzung eines technologiegestützten Markthochlaufs transformativer, CO<sub>2</sub>-armer Produkte und Methoden hingewiesen, mit deren Hilfe sich nicht nur eine deutlich stärker als bislang zu verzeichnende Entkopplung von Wirtschaftswachstum und THG-Emissionen, sondern auch eine Versöhnung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Belangen erreichen ließe.

Mit Blick auf ein rasch schwindendes nationales CO<sub>2</sub>-Budget drängt sich hierbei das Anschub- bzw. Anreiz-gestützte upscaling und eine breite Nutzung aller weit entwickelten verfügbaren bzw. zur Marktreife gelangten technologischen Optionen auf. Hinsichtlich einer raschen Implementierung transformativer Schritte ist neben einer engen Orientierung an Machbarkeiten eine Priorisierung signifikanter THG-Reduktionsschritte erforderlich, bis – auf einer deutlich längerfristigen Zeitschiene – geeignete und zugleich großflächig verfügbare CDR-Optionen zur Kompensation nicht vermeidbarer Restemissionen bereitgestellt werden können. Dass die Zeit für eine ambitioniertere Skizzierung sowie eine reale und „generationengerechte“ Umsetzung breit und langfristig angelegter sowie engmaschig anhand des tatsächlichen Erfolgs überprüfter Dekarbonisierungs-Strategien drängt, die zugleich konsistent mit dem Pariser Klimaabkommen und dem „European Green Deal“ sein müssen, hat nicht zuletzt auch das Klimaschutz-Urteil des Bundesverfassungsgerichtes vom 29. April 2021 unterstrichen (BVerfG, 2021). In diesem Sinne kann eine Fokussierung auf Wege und Strategien zur zeitnahen Umsetzung einer Vielzahl effektiver Maßnahmen für den Klimaschutz weitaus zielführender sein als eine lediglich auf abstrakte und politisch eher kurzfristig opportune Klimaziele fixierte Debatte.

Mithin ist eine Konsistenz der erforderlichen Maßnahmen sowie der Geschwindigkeit bei ihrer Implementierung sowohl im Hinblick auf das verbleibende nationale CO<sub>2</sub>-Budget als auch die mehrjährigen Zwischenziele sowie die jährlichen Zwischenschritte erforderlich. Ein zeitlich möglichst engmaschiges Monitoring hinsichtlich der Effizienz der eingeleiteten Maßnahmen, ergänzt um zeitnahe und wirksame Nachsteuerungsmechanismen, erscheint für eine übergeordnete Zielerreichung sowie Vermeidung von Lock-In-Effekten zwingend notwendig. Sowohl in der Debatte als auch bei der Implementierung ist hinsichtlich Zielführung, Effizienz, Umsetzungsgeschwindigkeiten und kontinuierlicher Nachsteuerung im Sinne einer Erfolgskontrolle die Beachtung einer sozioökonomischen Ausgewogenheit mindestens ebenso wichtig wie ein kontinuierlich geführter Dialog auf allen Ebenen.

Die Weichen für eine Klimaneutralität 2050 sowie ein THG-Minus von 65% bis 2030 werden in der nächsten Legislaturperiode gestellt. Das Regierungsprogramm nach der Bundestagswahl 2021 ist hierfür von zentraler Bedeutung (Prognos et al., 2020, 13). Nicht nur mit Blick auf rasch schwindende CO<sub>2</sub>-Restbudgets, sondern auch auf fortschreitende Klimawandelfolgen und -schäden darf keine Zeit mehr verloren werden: Das Regierungsprogramm 2021 muss die zentralen Politiken und Instrumente in Richtung Klimaneutralität formulieren, um auf diese Weise mehr Klimaschutz, eine stabile wirtschaftliche Entwicklung, eine bessere Lebensqualität und eine inklusive Gestaltung des anstehenden Wandels zu ermöglichen (Prognos et al., 2020, 14).

Im Rahmen des „European Green Deal“ soll noch im Jahr 2021 ein Aktionsprogramm für Zwischenziele zur beschlossenen Klimaneutralität bis 2050 vorgelegt werden, mit besonderem Fokus auf das Zwischenzieljahr

2030 (Prognos et al., 2020, 9). Die par-teiübergreifende Unterstützung für den „European Green Deal“ muss jedoch auch in Deutschland in entsprechendes nationales Handeln münden (Prognos et al., 2020, 14).

Letztlich ist das Ziel der Erreichung von Klimaneutralität eine große gesellschaftliche Aufgabe, deren Bewältigung mit einem gut vorbereiteten Marathonlauf zu vergleichen ist: Sie erfordert eine beispiellose Bereitschaft aller Akteure bzw. Akteursgruppen und politische Anstrengungen zur aktiven Gestaltung dieses Transformationsprozesses. Zudem ist das übergeordnete 1,5°C-Ziel nur mit großer Mitbestimmung und Teilhabe der Gesellschaft möglich. Technische Grenzen spielen dabei insgesamt eine geringere Rolle für einen Erfolg als der stets übergeordnete gesellschaftliche und politische Wille (Wuppertal Institut, 2020, 20).

## 5. WEITERFÜHRENDE AKTIVITÄTEN IM RAHMEN VON NETTO-NULL-2050

Vor dem Hintergrund der analysierten Studien hat sich **Netto-Null-2050** zum Ziel gesetzt, die wissenschaftlichen Erkenntnisse und Aktivitäten in der Helmholtz-Gemeinschaft für ein CO<sub>2</sub>-neutrales Deutschland in einer **Netto-Null-2050-Roadmap** zu bündeln. Somit soll diese zum einen ein Handlungsrahmen mit Empfehlungen sein, wann welche Aktivitäten erforderlich sind, um das Ziel der CO<sub>2</sub>-Neutralität in Deutschland im Jahr 2050 zu erreichen. Zum anderen soll ein Diskussionsrahmen für alle relevanten Akteur\*innen und Interessengruppen bereitgestellt werden. Innerhalb der für das Projekt definierten Systemgrenzen (Köhnke et al., 2020, **Project Briefing #1**) betrachtet Netto-Null-2050, wie in den verschiedensten Bereichen CO<sub>2</sub> vermieden, reduziert und aus der Atmosphäre entnommen werden kann.

Zu diesem Zweck wurde in **Netto-Null-2050** ein Szenario-Konzept entwickelt (**Project Briefing #4**, Simon et al., 2020), das diese drei Pfade des Klimaschutzes integriert. Grundlage der Analyse sind die Optionen der CO<sub>2</sub>-Vermeidung, die sich auf den Ausbau erneuerbarer Energien fokussiert. Schwerpunkt des Projekts sind dabei die detaillierte Abbildung der relevanten Technologien zur Reduktion und Entfernung des CO<sub>2</sub> in den Projekten 2-4, die einer vergleichenden Bewertung (Projekt 1, Technology Assessment Matrix, TAM) für die Roadmap unterzogen werden. Ausgehend von diesem Technologie-Vergleich werden dafür Carbon-Dioxide-Removal-Szenarien (CDR-Szenarien) erstellt, welche sinnvolle Kombinationen der CDR-Maßnahmen und Technologien bündelt.

Den CDR-Maßnahmen werden die Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Vermeidung gegenübergestellt. Für die Hauptemissionsquelle – den Energiesektor, der ca. aktuell > 85% der CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht (UNFCCC, 2020) – werden detaillierte Energieszenarien erstellt. Diese Szenarien integrieren die beiden Schwerpunkte der oben analysierten Studien: Zeitlich und technologisch hoch aufgelöste Transformationspfade bis 2050, der unter den Bedingungen des begrenzten CO<sub>2</sub>-Budgets einen schnellen Ausbau der erneuerbaren Energien erfordert. Auf Basis des für Deutschland definierten CO<sub>2</sub>-Budgets (vgl. Kapitel 2.1) wurden in einem ersten Schritt 85% auf den Energiesektor allokiert (Verkehr, Haushalte und Industrie & Gewerbe, einschließlich des Umwandlungs- und Bereitstellungssektors). Dies resultiert in möglichen Emissionen in Höhe von 6,5 Gt CO<sub>2</sub>, die für den Zeitraum 2020 – 2050 verbleiben.

In diesem Kontext ist darauf hinzuweisen, dass sich die in der Helmholtz-Klima-Initiative, wie etwa auch bei der IEA, zugrunde gelegte Sektorenabgrenzung grundsätzlich nach der Energiebilanz richtet und damit über den Sektor „Energieerzeugung“ (z.B. in Kraftwerken) hinausgeht: Diese umfasst damit auch den Energieeinsatz in der Industrie (Industry), in Haushalten (Residential), Dienstleistungen und Handel (GHD) und im Transportsektor.

Analog zu den beiden analysierten Studien (Prognos et al., 2020; Wuppertal Institut, 2020) wurde, wie in **Project Briefing #4** (Simon, et al., 2020) beschrieben, zunächst das grundlegende Ziel eines weitgehend klimaneutralen Energiesektors im Jahre 2050 festgelegt. Zahlreiche Energieszenarien mit Treibhausgas-Reduktionszielen von >90% für Deutschland wurden ausgewertet (siehe Projekt 1, Meilenstein 1.2.1, u.a. Bründlinger et al., 2018; Fette et al., 2020; Nitsch et al., 2012; Öko-Institut et al., 2015; Purr et al., 2020). Daraus wurde ein Ausblick für das deutsche Energiesystem innerhalb des **Netto-Null-2050**-Projekts abgeleitet, welches fast vollständig auf erneuerbaren Energien basiert. Der Weg dorthin erfordert einen rapiden Umbau aller genannter Sektoren, um einen entsprechenden Emissionspfad zu erreichen (siehe **Abbildung 4**).

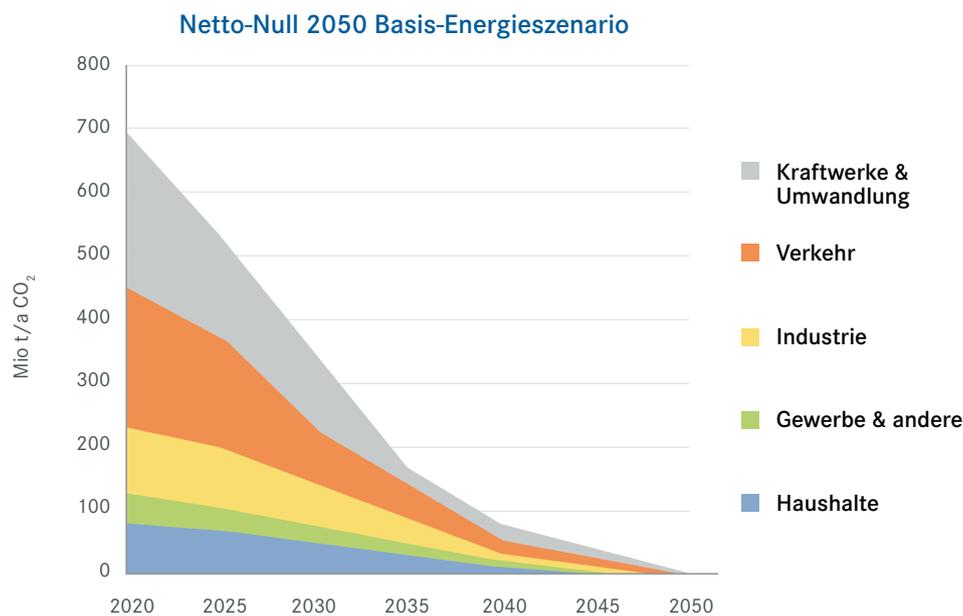


Abbildung 4: Notwendige Emissionsreduktion im Energiesystem unter dem in Netto-Null 2050 vorgegebenen CO<sub>2</sub> Budget/Carbon Budget (vorläufige Ergebnisse), ohne Berücksichtigung weiterer CDR-Maßnahmen und -Technologien.

Das Basis-Szenario mit den zugrundeliegenden Annahmen zu Bedarf und Bereitstellung sowie den relevanten techno-ökonomischen Daten, wird derzeit im Meilenstein 1.2.2 der Helmholtz-Klima-Initiative dokumentiert. Das Zusammenspiel von CDR-Szenarien und Energietransformationspfade als Beitrag zu einer **Netto-Null-2050-Roadmap** ist eine zentrale Forschungsaufgabe im weiteren Verlauf des Projekts.

## Netto-Null-2050 Web-Atlas<sup>5</sup>

Der im Rahmen der Helmholtz-Klima-Initiative erstellte Netto-Null-2050 Web-Atlas wird zentrale Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitspaketen in Form einer kartografischen Darstellung bzw. einer Storyline darstellen.

Hierfür werden im Laufe des Jahres 2021 die Forschungsergebnisse aus den unterschiedlichen Disziplinen der Helmholtz-Klima-Initiative kompakt visualisiert und verständlich erläutert sowie der jeweilige Beitrag der Dekarbonisierungsmethoden und -technologien zur THG-Reduktion in Deutschland, bezogen auf das CO<sub>2</sub>, quantifiziert. Darin werden auch zwei Fallstudien aus der Praxis enthalten sein.

<sup>5</sup> Nähere Informationen dazu siehe <https://atlas.netto-null.org>

## DANKSAGUNG

Wir danken Nadine Mengis vom GEOMAR, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel, für die Bereitstellung der Übersichtstabelle zum deutschen CO<sub>2</sub>-Budget sowie den kritisch prüfenden Blick auf die Inhalte des zugehörigen Kapitels 2.1.

## LITERATUR

- Beermann, A.-C., Fiedler, S., Meyer, M., Runkel, M., Schrems, I., Zerkow, F. (2020): Zehn klimaschädliche Subventionen im Fokus – Wie ein Subventionsabbau den Klimaschutz voranbringt und den Bundeshaushalt entlastet. Eine Studie des Forums Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft im Auftrag von Greenpeace  
[https://foes.de/publikationen//2020/2020-11\\_FOES\\_10\\_klimaschaedliche\\_Subventionen\\_im\\_Fokus.pdf](https://foes.de/publikationen//2020/2020-11_FOES_10_klimaschaedliche_Subventionen_im_Fokus.pdf)
- Bründlinger, T., König, J. E., Frank, O., Gründig, D., Jugel, C., Kraft, P., et al. (2018). dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Retrieved from Berlin/Köln, Germany  
[https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_Ergebnisbericht.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_Ergebnisbericht.pdf)
- Bundesanzeiger (2019): Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften  
[https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBl#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl119s2513.pdf%27%5D\\_\\_1612531825829](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl119s2513.pdf%27%5D__1612531825829) (letzter Zugriff : 5. Februar 2021)
- Bundesanzeiger (2020): Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz)  
[https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBl&jumpTo=bgbl120s1818.pdf#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl120s1818.pdf%27%5D\\_\\_1612532110425](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl120s1818.pdf#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1818.pdf%27%5D__1612532110425) (letzter Zugriff : 5. Februar 2021)
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019): Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz – BEHG)  
<http://www.gesetze-im-internet.de/behg/BEHG.pdf> (letzter Zugriff : 5. Februar 2021)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, 2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Berlin  
[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf) (letzter Zugriff : 5. Februar 2021)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie, Berlin  
<https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf> (letzter Zugriff : 5. Februar 2021)

- Bundesverfassungsgericht (BVerfG, 2021): Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich, Pressemitteilung Nr. 31/2021 vom 29. April 2021 zum Beschluss vom 24. März 2021 (1 BvR 2656/18, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20, 1 BvR 288/20, 1 BvR 96/20, 1 BvR 78/20), Karlsruhe

<https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html> (letzter Zugriff: 30. April 2021)
- Der Standard (2020): Handelsexpertin: „Schiedsgerichte schaffen Paralleljustiz für Reiche“

<https://www.derstandard.at/story/2000120935277/handelsexpertin-schiedsgerichte-schaffen-paralleljustiz-fuer-reiche> (letzter Zugriff : 5. Februar 2021)
- Deutscher Bundestag (2009). Klagemöglichkeiten von Energiekonzernen im Rahmen internationaler Investitionsschutzverträge

<https://www.bundestag.de/resource/blob/410888/57e0466c45775d112a92dab263094de9/WD-5-069-09-pdf-data.pdf> (letzter Zugriff: 5. Februar 2021)
- EndFossilProtection.org (2020): Open letter from climate leaders and scientists to signatories of the Energy Charter Treaty (ECT).

<https://www.endfossilprotection.org> (letzter Zugriff: 5. Februar 2021)
- Energy Charter (o.J.): Der Vertrag über die Energiecharta und dazugehörige Dokumente

<http://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Legal/ECT-de.pdf> (letzter Zugriff: 5. Februar 2021)
- European Commission (2020a): EU text proposal for the modernisation of the Energy Charter Treaty (ECT)

[https://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2020/may/tradoc\\_158754.pdf](https://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2020/may/tradoc_158754.pdf) (letzter Zugriff: 5. Februar 2021)
- Europäische Kommission (2020b): Ein europäischer Grüner Deal. Erster klimaneutraler Kontinent werden

[https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de) (letzter Zugriff: 5. Februar 2021)
- Europäische Kommission (o.J.): Klimaschutzmaßnahmen der EU und der europäische Grüne Deal

[https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_de) (letzter Zugriff: 5. Februar 2021)
- Fette, M., Brandstätter, C., Gils, H. C., Gardian, H., Pregger, T., Schaffert, J., et al. (2020). Multi-Sektor-Kopplung-Modellbasierte Analyse der Integration erneuerbarer Stromerzeugung durch die Kopplung der Stromversorgung mit dem Wärme-, Gas- und Verkehrssektor.

Retrieved from <https://elib.dlr.de/135971/>
- Global Arbitration News (2015): Italy Withdraws from Energy Charter Treaty

<https://globalarbitrationnews.com/italy-withdraws-from-energy-charter-treaty-20150507> (letzter Zugriff: 5. Februar 2021)
- Köhnke, F., Görl, K., Mengis, N., Oschlies, A., Steuri, B. & Jacob, D. (2020): System Definition and Integration of Key Actors [Part 1] [Version 1]. Hamburg: Climate Service Center Germany (GERICS)

- Markus, T., Schaller, R., Korte, K. Gawel, E. (2020): Rechtliche und ökonomische Anforderungen im europäischen und deutschen Recht  
[https://www.netto-null.org/imperia/md/assets/net\\_zero/dokumente/2020\\_netto-null-2050\\_deliverable\\_m-p2.1\\_web.pdf](https://www.netto-null.org/imperia/md/assets/net_zero/dokumente/2020_netto-null-2050_deliverable_m-p2.1_web.pdf)
- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds., 2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Geneva, Switzerland  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15\\_Full\\_Report\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf)
- Mengis, N., Simon, S., Thoni, T., Stevenson, A., Görl, K., Steuri, B., Oschlies, A. (2020): Defining the German Carbon Budget, Project Briefing #2, Version #1, June 2020  
[https://www.netto-null.org/imperia/md/assets/net\\_zero/dokumente/2\\_carbonbudget\\_web.pdf](https://www.netto-null.org/imperia/md/assets/net_zero/dokumente/2_carbonbudget_web.pdf)
- Meyer, A. (1999): The Kyoto Protocol and the Emergence of “Contraction and Convergence” as a Framework for an International Political Solution to Greenhouse Gas Emissions Abatement. In: Hohmeyer O., Rennings K. (eds) Man-Made Climate Change. ZEW Economic Studies (Publication Series of the Centre for European Economic Research (ZEW), Mannheim, Germany), vol 1. Physica, Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-47035-6\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-47035-6_15)
- Nitsch, J., Pregger, T., Naegler, T., Dominik Heide, Tena, D. L. d., Trieb, F., et al. (2012). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Retrieved from Stuttgart, Kassel, Teltow  
[http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische\\_Papiere\\_anderer/12.03.29.BMU\\_Leitstudie2011/BMU\\_Leitstudie2011.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_anderer/12.03.29.BMU_Leitstudie2011/BMU_Leitstudie2011.pdf)
- Öko-Institut, & FhG ISI. (2015). Klimaschutzszenario 2050.  
Retrieved from <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität  
[https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020\\_10\\_KNDE/A-EW\\_195\\_KNDE\\_WEB\\_V111.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB_V111.pdf)
- Purr, K., Günther, J., Lehmann, H., & Nuss, P. (2020). Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE-Studie. Retrieved from Dessau-Roßlau  
<https://www.umweltbundesamt.de/rescue>
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU, 2020a): Using the CO<sub>2</sub> budget to meet the Paris climate targets  
[https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/01\\_Environmental\\_Reports/2020\\_08\\_environmental\\_report\\_chapter\\_02.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/01_Environmental_Reports/2020_08_environmental_report_chapter_02.pdf?__blob=publicationFile&v=6) (letzter Zugriff: 5. Februar 2021)

- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU, 2020b). Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa [Umweltgutachten 2020].  
[https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/2016\\_2020/2020\\_Umweltgutachten\\_Entschlossene\\_Umweltpolitik.pdf;jsessionid=2803A6FBD0D57FDEA2D6D41765FE384E.1\\_cid331?\\_\\_blob=publicationFile&v=30](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.pdf;jsessionid=2803A6FBD0D57FDEA2D6D41765FE384E.1_cid331?__blob=publicationFile&v=30) (letzter Zugriff: 22. Februar 2021)
- Simon, S., Mengis, N., Görl, K., Steuri, B., & Oschlies, A. (2020). Project Briefing# 4 Defining the scenario approach.  
Retrieved from [https://www.netto-null.org/imperia/md/assets/net\\_zero/dokumente/4\\_scenarioapproach\\_web.pdf](https://www.netto-null.org/imperia/md/assets/net_zero/dokumente/4_scenarioapproach_web.pdf)
- UNFCCC. (2020). GHG Data Interface, Report produced on Tuesday, 12 May 2020.  
Retrieved from <https://unfccc.int/>
- Wuppertal Institut (2020). CO<sub>2</sub>-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze. Bericht. Wuppertal  
[https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7606/file/7606\\_CO2-neutral\\_2035.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7606/file/7606_CO2-neutral_2035.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## ANHANG: EINE AUSWAHL WEITERFÜHRENDER LITERATUR ZU FACHVERWANDTEN THEMEN, SORTIERT NACH AKTUALITÄT

### Klimapolitik Deutschlands und der EU

- 1) Bals, C. et al. (2020): EU-Klimaziele: Germanwatch-Position  
[https://www.germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/Germanwatch-Position%20EU-Ziele%202020\\_0.pdf](https://www.germanwatch.org/sites/germanwatch.org/files/Germanwatch-Position%20EU-Ziele%202020_0.pdf)  
(letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 2) Pahle, M. et al (2020): Die Anschärfung der EU-2030-Klimaziele und Implikationen für Deutschland, Potsdam  
<https://www.energie.de/et/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/die-anschaerfung-der-eu-2030-klimaziele-und-implikationen-fuer-deutschland-20201216/> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 3) Pahle, M. (2020): Schriftliche Stellungnahme zum Thema „Ökologische Aspekte des Kohleausstiegs, Potsdam  
[https://www.bundestag.de/resource/blob/700506/685f63fafc6a1056d5d18a0747773c32/19-16-352-C\\_PIK-data.pdf](https://www.bundestag.de/resource/blob/700506/685f63fafc6a1056d5d18a0747773c32/19-16-352-C_PIK-data.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 4) Menner, M. et al (2019): Wirksame CO<sub>2</sub>-Bepreisung – Fahrplan für Deutschland und Europa, Freiburg i.Br.  
[https://www.cep.eu/fileadmin/user\\_upload/cep.eu/Studien/cepStudie\\_Wirksame\\_CO2-Bepreisung\\_-\\_Jetzt\\_die\\_Weichen\\_richtig\\_stellen\\_\\_01.pdf](https://www.cep.eu/fileadmin/user_upload/cep.eu/Studien/cepStudie_Wirksame_CO2-Bepreisung_-_Jetzt_die_Weichen_richtig_stellen__01.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 5) Oschlies, A. et al. (2019): Climate Engineering und unsere Klimaziele –eine überfällige Debatte, (DFG-SPP 1689 „Climate Engineering“)  
[https://www.spp-climate-engineering.de/files/ce-projekt/media/download\\_PDFs/climateengineering\\_spp1689\\_brosch.pdf](https://www.spp-climate-engineering.de/files/ce-projekt/media/download_PDFs/climateengineering_spp1689_brosch.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 6) Europäische Kommission (2018): Ein sauberer Planet für alle - Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft, Brüssel  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 7) Europäische Kommission (2014): Ein Rahmen für die EU Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020-2030, Brüssel  
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2014:0015:FIN:DE:PDF> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

### Klimaschutzszenarien

- 1) Kriegler, E. et al. (2020): Ausstieg aus fossilen Energieträgern – Wie gelingt eine faire Systemtransformation? Hintergrundpapier zum 7. Forum Klimaökonomie, Kapitel 2.  
[https://www.klimadialog.de/fileadmin/Dateiverwaltung/Klimadialog/Publications/Hintergrundpapier\\_Forum\\_7\\_\\_Ausstieg\\_aus\\_fossilen\\_Energien.pdf](https://www.klimadialog.de/fileadmin/Dateiverwaltung/Klimadialog/Publications/Hintergrundpapier_Forum_7__Ausstieg_aus_fossilen_Energien.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

2) Lebois, O. et al. (2020): TYNDP 2020 - Electricity and gas joint Scenario Report, Brüssel

[https://www.entsog.eu/sites/default/files/2020-07/TYNDP\\_2020\\_Joint\\_Scenario%20Report%20ENTSOG\\_ENT-SOE\\_June\\_Final.pdf](https://www.entsog.eu/sites/default/files/2020-07/TYNDP_2020_Joint_Scenario%20Report%20ENTSOG_ENT-SOE_June_Final.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## Dekarbonisierung nach Sektoren

1) Kriegler, E. et al. (2020): Ausstieg aus fossilen Energieträgern – Wie gelingt eine faire Systemtransformation?. Hintergrundpapier zum 7. Forum Klimaökonomie, Kapitel 4.

[https://www.klimadialog.de/fileadmin/Dateiverwaltung/Klimadialog/Publications/Hintergrundpapier\\_Forum\\_7\\_\\_Ausstieg\\_aus\\_fossilen\\_Energien.pdf](https://www.klimadialog.de/fileadmin/Dateiverwaltung/Klimadialog/Publications/Hintergrundpapier_Forum_7__Ausstieg_aus_fossilen_Energien.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

2) Pahle, M. (2020): Schriftliche Stellungnahme zum Thema „Ökologische Aspekte des Kohleausstiegs“, Potsdam

[https://www.bundestag.de/resource/blob/700506/685f63fafc6a1056d5d18a0747773c32/19-16-352-C\\_PIK-data.pdf](https://www.bundestag.de/resource/blob/700506/685f63fafc6a1056d5d18a0747773c32/19-16-352-C_PIK-data.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

3) Jakob, M., Steckel, J.C., Jotzo, F. et al. The future of coal in a carbon-constrained climate. Nat. Clim. Chang. 10, 704–707 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0866-1>

<https://www.nature.com/articles/s41558-020-0866-1> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

4) Oei, P.-Y, Brauers, H., Herpich, P. (2020): Lessons from Germany’s hard coal mining phase-out: policies and transition from 1950 to 2018, Climate Policy, 20:8, 963-979, DOI: 10.1080/14693062.2019.1688636

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2019.1688636> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

5) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin

[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## Energieeffizienz

1) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU, 2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimapolitische Ziele und Grundsätze der Bundesregierung (2016), 7 und Kapitel 3.2, 3.3, 4.2, 5.1., 5.2., 5.3, 5.4, 5.7

[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

2) Europäische Kommission (2014): Ein Rahmen für die EU Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020-2030, Brüssel, Kapitel 2.3

<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2014:0015:FIN:DE:PDF> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 3) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Kapitel B, Berlin

[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## Ländervergleiche

- 1) Brauers, H. et al. (2020): Comparing coal phase-out pathways: The United Kingdom's and Germany's diverging transitions, Science direct, Environmental Innovation and Societal Transitions, Vol. 37, 238-253, <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.09.001>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210422420301143> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 2) Brauers, H. et al. (2020): The political economy of coal in Poland: Drivers and barriers for a shift away from fossil fuels, Science direct, Energy Policy, Vol. 144, 111621, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111621>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421520303578?via%3Dihub> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## Emissionshandel und CO<sub>2</sub>-Bepreisung

- 1) Pahle, M. (2020): Schriftliche Stellungnahme zum Thema „Ökologische Aspekte des Kohleausstiegs Kapitel 1, Potsdam

[https://www.bundestag.de/resource/blob/700506/685f63fafc6a1056d5d18a0747773c32/19-16-352-C\\_PIK-data.pdf](https://www.bundestag.de/resource/blob/700506/685f63fafc6a1056d5d18a0747773c32/19-16-352-C_PIK-data.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 2) Menner, M., Reichert, G. (2019): Der neue deutsche Emissionshandel. Richtiger Ansatz, falsche Ausgestaltung, ceplnput 10/2019, Freiburg i. Br.

[https://www.cep.eu/fileadmin/user\\_upload/cep.eu/Studien/ceplnput\\_Der\\_neue\\_deutsche\\_Emissionshandel/ceplnput\\_Der\\_neue\\_deutsche\\_Emissionshandel.pdf](https://www.cep.eu/fileadmin/user_upload/cep.eu/Studien/ceplnput_Der_neue_deutsche_Emissionshandel/ceplnput_Der_neue_deutsche_Emissionshandel.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 3) Menner, M. et al. (2019): Wirksame CO<sub>2</sub>-Bepreisung – Fahrplan für Deutschland und Europa, Kapitel 4f., Freiburg i.Br.

[https://www.cep.eu/fileadmin/user\\_upload/cep.eu/Studien/cepStudie\\_Wirksame\\_CO2-Bepreisung\\_-\\_Jetzt\\_die\\_Weichen\\_richtig\\_stellen\\_\\_01.pdf](https://www.cep.eu/fileadmin/user_upload/cep.eu/Studien/cepStudie_Wirksame_CO2-Bepreisung_-_Jetzt_die_Weichen_richtig_stellen__01.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 4) Europäische Kommission (2014): Ein Rahmen für die EU Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020-2030, Kapitel 2.4, Brüssel

<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2014:0015:FIN:DE:PDF> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 5) Zerkaw, F., Schrems, I., Fiedler, S. (2020): Wie kann der nationale CO<sub>2</sub>-Preis zum wirksamen Klimaschutzinstrument werden? Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft, Policy Brief 10/020, Berlin

[https://foes.de/publikationen/2020/2020-10\\_FOES\\_BEHG\\_Carbon\\_Leakage\\_Policy\\_Brief.pdf](https://foes.de/publikationen/2020/2020-10_FOES_BEHG_Carbon_Leakage_Policy_Brief.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 6) Nallinger, S. (2020): Für eine klimaneutrale Wirtschaft made-in-Europe. Jetzt gemeinsam den Neustart einleiten! Positionspapier der Stiftung 2°

[https://www.stiftung2grad.de/wp-content/uploads/2020/10/EU-Positionspapier-2%C2%B0\\_DE-1.pdf](https://www.stiftung2grad.de/wp-content/uploads/2020/10/EU-Positionspapier-2%C2%B0_DE-1.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 7) Menner, M. et al (2019): Der neue deutsche Emissionshandel. Richtiger Ansatz, falsche Ausgestaltung, ceplnput 10/2019, Kapitel 2, Freiburg i. Br.

[https://www.cep.eu/fileadmin/user\\_upload/cep.eu/Studien/ceplnput\\_Der\\_neue\\_deutsche\\_Emissionshandel/ceplnput\\_Der\\_neue\\_deutsche\\_Emissionshandel.pdf](https://www.cep.eu/fileadmin/user_upload/cep.eu/Studien/ceplnput_Der_neue_deutsche_Emissionshandel/ceplnput_Der_neue_deutsche_Emissionshandel.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 8) Menner, M. et al. (2019): Wirksame CO<sub>2</sub>-Bepreisung – Fahrplan für Deutschland und Europa. Fahrplan für Deutschland und Europa: Emissionshandel ohne Preisgrenzen für Verkehr und Gebäude, Freiburg i. Br.

[https://www.cep.eu/fileadmin/user\\_upload/cep.eu/Studien/cepStudie\\_Wirksame\\_CO2-Bepreisung\\_-\\_Jetzt\\_die\\_Weichen\\_richtig\\_stellen\\_\\_01.pdf](https://www.cep.eu/fileadmin/user_upload/cep.eu/Studien/cepStudie_Wirksame_CO2-Bepreisung_-_Jetzt_die_Weichen_richtig_stellen__01.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## Technologieförderungen mit dem Ziel der Dekarbonisierung

- 1) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2020): Deutsche Wasserstoff-Strategie, Kapitel IV, Berlin

<https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 2) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, 2020): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Kapitel G, Berlin

[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 3) Nallinger, S. (2020): Für eine klimaneutrale Wirtschaft made-in-Europe. Jetzt gemeinsam den Neustart einleiten! Positionspapier der Stiftung 2°

[https://www.stiftung2grad.de/wp-content/uploads/2020/10/EU-Positionspapier-2%C2%B0\\_DE-1.pdf](https://www.stiftung2grad.de/wp-content/uploads/2020/10/EU-Positionspapier-2%C2%B0_DE-1.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 4) Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG, 2016)

<http://www.gesetze-im-internet.de/windseeg/> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 5) Elektromobilitätsgesetz (EmoG, 2015)

[http://www.gesetze-im-internet.de/emog/\\_\\_1.html](http://www.gesetze-im-internet.de/emog/__1.html) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 6) Energie- und Klimafondsgesetz (EKFG, 2011)

<http://www.gesetze-im-internet.de/ekfg/index.html> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## Negative Emissionen und Negativ-Emissions-Technologies (NETs)

- 1) Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J. et al. (2019): The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal. Nature 575, 87–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>  
<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1681-6> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 2) Deutscher Bundestag (2019): Potenziale von CDR-Technologien für den Hightech-Standort Deutschland, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Mario Brandenburg (Südpfalz), Katja Suding, Dr. Jens Brandenburg (Rhein-Neckar), weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/13363 –, Berlin  
<https://docplayer.org/183495803-Potenziale-von-cdr-technologien-fuer-den-hightech-standort-deutschland.html> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 3) Oschlies, A. et al. (2019): Climate Engineering und unsere Klimaziele –eine überfällige Debatte, (DFG-SPP 1689 „Climate Engineering“)  
[https://www.spp-climate-engineering.de/files/ce-projekt/media/download\\_PDFs/climateengineering\\_spp1689\\_brosch.pdf](https://www.spp-climate-engineering.de/files/ce-projekt/media/download_PDFs/climateengineering_spp1689_brosch.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 4) Deutscher Bundestag (2019): Evaluierungsbericht der Bundesregierung über die Anwendung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes sowie die Erfahrungen zur CCS-Technologie, Drucksache 19/689  
<http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/19/068/1906891.pdf> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 5) Europäische Kommission (2018): Ein sauberer Planet für alle – Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft, Kapitel 3.7, Brüssel  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 6) European Academies‘ Science Advisory Council (EASAC, 2018): Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? EASAC policy report 35, Brüssel  
[https://easac.eu/fileadmin/PDF\\_s/reports\\_statements/Negative\\_Carbon/EASAC\\_Report\\_on\\_Negative\\_Emission\\_Technologies.pdf](https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 7) The Royal Society (2018): Greenhouse gas removal, London  
<https://royalsociety.org/topics-policy/projects/greenhouse-gas-removal/> (letzter Zugriff: 29. April 2021)  
<https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/greenhouse-gas-removal/royal-society-greenhouse-gas-removal-report-2018.pdf> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 8) Fuss, S. et al (2018): Negative emissions-Part 2: Costs, potentials and side effects, Environ. Res. Lett. 13 063002  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 9) Haszeldine, S, Flude, S., Johnson, G., Scott, V. (2018): Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments, The Royal Society, London  
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0447> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

- 10) Kern, F., Gaede, J., Meadowcroft, J. Watson, J. (2016): The political economy of carbon capture and storage: An analysis of two demonstration projects, ScienceDirect, Technological Forecasting and Social Change, Vol. 102, 250-260, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.09.010>  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162515002723?via%3Dihub> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 11) Europäische Kommission (2014): Ein Rahmen für die EU Klima- und Energiepolitik im Zeitraum 2020-2030, Kapitel 4.3, Brüssel  
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2014:0015:FIN:DE:PDF> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 12) Kohlendioxidspeicherungsgesetz (KSpG, 2012)  
<http://www.gesetze-im-internet.de/kspg/index.html> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## Energiewende und soziale Nachhaltigkeit

- 1) Wolf, I. et al. (2020): Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energiewende 2019, Potsdam  
[https://publications.iass-potsdam.de/rest/items/item\\_6000053\\_3/component/file\\_6000054/content](https://publications.iass-potsdam.de/rest/items/item_6000053_3/component/file_6000054/content) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 2) Bundesregierung (2018) Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Aktualisierung 2018, Berlin  
<https://www.bundesregierung.de/resource/blob/992814/1559082/a9795692a667605f652981aa9b6cab51/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-aktualisierung-2018-download-bpa-data.pdf> (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## Systemtransformation im Zuge der COVID-19-Pandemie

- 1) Agora Energiewende, Agora Verkehrswende (2020): Der Doppelte Booster - Vorschlag für ein zielgerichtetes 100-Milliarden-Wachstums- und Investitionsprogramm, Berlin  
[https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020-05\\_Doppelter-Booster/179\\_A-EW\\_A-VW\\_Doppelter-Booster\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020-05_Doppelter-Booster/179_A-EW_A-VW_Doppelter-Booster_WEB.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 2) Gawel, E., Lehmann, P. (2020): Staatsprogramme gegen die Corona-Krise – eine Option für den Klimaschutz? Wirtschaftsdienst, Heft 7, 510–515  
<https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2020/heft/7/beitrag/staatsprogramme-gegen-die-corona-krise-eine-option-fuer-den-klimaschutz.html> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 3) Barbier, E.B. (2020): Greening the Post-pandemic Recovery in the G20, Environ Resource Econ 76, 685–703. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00437-w>  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10640-020-00437-w> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 4) Nallinger, S. (2020): Für eine klimaneutrale Wirtschaft made-in-Europe. Jetzt gemeinsam den Neustart einleiten! Positionspapier der Stiftung 2°  
[https://www.stiftung2grad.de/wp-content/uploads/2020/10/EU-Positionspapier-2%C2%B0\\_DE-1.pdf](https://www.stiftung2grad.de/wp-content/uploads/2020/10/EU-Positionspapier-2%C2%B0_DE-1.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## European Green Deal

- 1) Agora Energiewende, Agora Verkehrswende (2020): Der Doppelte Booster: Vorschlag für ein zielgerichtetes 100-Milliarden-Wachstums- und Investitionsprogramm, Kapitel 9, Berlin  
[https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020-05\\_Doppelter-Booster/179\\_A-EW\\_A-VW\\_Doppelter-Booster\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020-05_Doppelter-Booster/179_A-EW_A-VW_Doppelter-Booster_WEB.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 2) Nallinger, S. (2020): Für eine klimaneutrale Wirtschaft made-in-Europe. Jetzt gemeinsam den Neustart einleiten! Positionspapier der Stiftung 2°  
[https://www.stiftung2grad.de/wp-content/uploads/2020/10/EU-Positionspapier-2%C2%B0\\_DE-1.pdf](https://www.stiftung2grad.de/wp-content/uploads/2020/10/EU-Positionspapier-2%C2%B0_DE-1.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 3) Pahle, M. et al. (2020): Die Anschärfung der EU-2030-Klimaziele und Implikationen für Deutschland, Potsdam  
<https://www.energie.de/et/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/die-anschaerfung-der-eu-2030-klimaziele-und-implikationen-fuer-deutschland-20201216/> (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 4) Pahle, M. (2020): Schriftliche Stellungnahme zum Thema „Ökologische Aspekte des Kohleausstiegs, Kapitel 3, Potsdam  
[https://www.bundestag.de/resource/blob/700506/685f63fafc6a1056d5d18a0747773c32/19-16-352-C\\_PIK-data.pdf](https://www.bundestag.de/resource/blob/700506/685f63fafc6a1056d5d18a0747773c32/19-16-352-C_PIK-data.pdf) (letzter Zugriff: 29. April 2021)
- 5) European Commission (2018): European Green Deal -The Commission presents strategy for a climate neutral Europe by 2050, Questions and answers, Brüssel  
[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO\\_18\\_6545](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_18_6545) (letzter Zugriff: 29. April 2021)

## AUTORINNEN UND AUTOREN

Knut Gör1<sup>1</sup>, Markus Groth<sup>1</sup>, Bettina Steuri<sup>1</sup>,  
Sonja Simon<sup>2</sup>, Stefan Vögele<sup>3</sup>, Daniela Jacob<sup>1</sup>

1 Climate Service Center Germany (GERICS) |  
Helmholtz-Zentrum Hereon

2 Institut für Vernetzte Energiesystem |  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

3 Forschungs-Zentrum Jülich (FZJ)

## KONTAKT

**Climate Service Center Germany (GERICS)**  
**Helmholtz-Zentrum hereon GmbH**

Chilehaus, Eingang B  
Fischertwiete 1  
D-20095 Hamburg

Tel.: 040-226 338-0

Fax: 040-226 338-163

[www.climate-service-center.de](http://www.climate-service-center.de)

Die Helmholtz-Klima-Initiative (HI-CAM) wird mit Mitteln des Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz-Gemeinschaft (IVF) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

**Weitere Ergebnisse aus dem Projekt Netto-Null-2050 finden Sie hier:**

[www.netto-null.org](http://www.netto-null.org)

[www.helmholtz-klima.de/presse/mediathek](http://www.helmholtz-klima.de/presse/mediathek)

## Beteiligte Zentren:

1



Eine Einrichtung des Helmholtz-Zentrums Hereon

2



3

