



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEN
DER WISSENSCHAFTEN

Februar 2023
Stellungnahme

Wie wird Deutschland klimaneutral?

Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement



„Energiesysteme der Zukunft“ ist ein Projekt von:

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina | www.leopoldina.org

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften | www.acatech.de

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften | www.akademienunion.de

Impressum

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Koordinierungsstelle München, Karolinenplatz 4, 80333 München | www.acatech.de

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | www.leopoldina.org

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | www.akademienunion.de

Empfohlene Zitierweise

acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.): *Wie wird Deutschland klimaneutral? Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2023. ISBN: 978-3-8047-4423-3

Redaktion

Anja Lapac, acatech

Wissenschaftliche Koordination

Prof. Dr. Mario Ragwitz, AG-Leitung, Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG
Prof. Dr. Anke Weidlich, AG-Leitung, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) Universität Freiburg
Célia Burghardt, Albert-Ludwig-Universität Freiburg
Dr. Berit Erlach, Koordinierungsstelle ESYS | acatech
Jörn Gierds, Koordinierungsstelle ESYS | acatech
Ulrike Herrmann, Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG
Dr. Mirko Schäfer, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) Universität Freiburg
Dr. Jenny Winkler, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Bastian Zachmann, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Lin Zheng, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Produktionskoordination und Satz

Annika Seiler, acatech

Gestaltung

aweberdesign.de. Büro für Gestaltung

Druck

Joh. Walch GmbH & Co. KG, Augsburg
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN: 978-3-8047-4423-3

DOI: https://doi.org/10.48669/esys_2023-2

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Vorwort

In seinem Ende 2022 veröffentlichten Zweijahresgutachten stellt der Expertenrat für Klimafragen fest, dass die bisherigen Emissionsreduktionsraten bei weitem nicht ausreichen, um die Klimaziele für 2030 zu erreichen. Auch mit den bis 2021 implementierten Politikinstrumenten ist in keinem Sektor eine Zielerreichung in Sicht. Zudem sind durch die aktuelle Energiepreiskrise Themen wie Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit von Energie in den Vordergrund gerückt. Trotzdem sollte der Klimaschutz jetzt erst recht nicht in den Hintergrund geraten.

Wie kann eine klimaneutrale Energieversorgung gelingen? Dieser Frage hat sich eine Arbeitsgruppe des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) angenommen. Die Arbeitsgruppe hat dazu aktuelle Studien ausgewertet und eigene Szenarien berechnet.

Die Expertinnen und Experten sehen in Effizienz und Suffizienz zentrale Hebel, um die Energienachfrage zu reduzieren und damit Treibhausgasemissionen zu vermeiden. Die gesamte Energieversorgung muss zudem auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Um Klimaneutralität zu erreichen, müssen aber auch die schwer vermeidbaren Prozessemissionen aus der Industrie reduziert werden. Besonders wichtig sind dabei die energieintensiven Branchen Stahlerzeugung, Chemieindustrie und Zementproduktion, denn sie sind für einen Großteil der Emissionen verantwortlich. Nur im Dreiklang von Kreislaufwirtschaft, Materialeffizienz/-substitution und klimaneutralen Prozessen wird es aus Sicht der Expertinnen und Experten gelingen, die gesteckten Ziele für die Industrie zu erreichen.

Negativen Emissionen messen die Expertinnen und Experten in ihrer Studie einen unerlässlichen Beitrag zum Klimaschutz bei. Sowohl technische als auch landbasierte CO₂-Entnahmeverfahren werden notwendig sein, um schwer vermeidbare Emissionen bis 2045 auszugleichen und Klimaneutralität in Deutschland zu erreichen.

Für all diese Bereiche braucht es eine politische Gestaltung von Maßnahmen, die bestehende Marktmechanismen, allen voran die CO₂-Bepreisung, ergänzt, etwa durch eine aktive Suffizienzpolitik. Nur im Zusammenspiel tiefgreifender Maßnahmen in allen Bereichen, so die Fachleute, kann die erforderliche umfassende Transformation des Energiesystems und der Industrie hin zur Klimaneutralität gelingen. Diese Strategien gleichzeitig zu verfolgen, kann dazu beitragen, Zielverfehlungen in einzelnen Teilbereichen durch Erfolge in anderen auszugleichen.

Wir danken den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie den Gutachterinnen und Gutachtern herzlich für ihr Engagement.



Prof. (ETHZ) Dr. Gerald Haug
Präsident
Nationale Akademie der
Wissenschaften Leopoldina



Prof. Dr.-Ing. Jan Wörner
Präsident
acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften



Prof. Dr. Dr. h.c. mult.
Christoph Marksches
Präsident Union der deutschen
Akademien der Wissenschaften

Inhalt

Abkürzungen und Einheiten	7
Glossar	8
Zusammenfassung.....	13
1 Einleitung.....	23
2 Transformationspfade zu einer klimaneutralen Energieversorgung und Produktion	26
2.1 Vom Ende der Umwandlungskette her gedacht: die Energienachfrage.....	26
2.2 Szenarien für eine klimaneutrale Energieversorgung.....	33
2.3 Ist eine klimaneutrale Energieversorgung vor 2045 durch schnelleren Technologiehochlauf oder eine Reduktion der Energienachfrage möglich?	42
2.4 Prozesse umstellen und Ressourcen schonen: Strategien zur klimaneutralen Industrie.....	45
2.5 Schwer vermeidbare Treibhausgase langfristig binden: CO ₂ -Entnahme aus der Atmosphäre	49
3 Übergreifende Handlungsoptionen.....	53
Handlungsfeld 1: Zielbegriff und Lösungsraum für eine nachhaltige Energiewende erweitern.....	53
Handlungsfeld 2: Energiewende als gesellschaftlichen Prozess gestalten.....	55
Handlungsfeld 3: „Getting the Price Right“ für Klimaneutralität	58
Handlungsfeld 4: Wichtige Netzinfrastrukturen rechtzeitig ausbauen	62
Handlungsfeld 5: Transparente und verlässliche Leitplanken für den Einsatz von Elektrifizierung, Wasserstoff, PtX und Biomasse setzen	63
Handlungsfeld 6: Energiewendekompetenzen bei Fachkräften erweitern und Informationen frei bereitstellen.....	66
Handlungsfeld 7: Wirksamkeit von Maßnahmen kontinuierlich überprüfen	68

4	Rahmenbedingungen für Verbrauchsreduktion politisch gestalten	72
	Handlungsfeld 8: Wissenschaftliche Forschung zur Integration von Verbrauchsreduktionsstrategien stärken	73
	Handlungsfeld 9: Mobilität neu denken	74
	Handlungsfeld 10: Wohnqualität, Flächennutzung und Klimaanpassung in den Fokus nehmen	77
	Handlungsfeld 11: Energiebedarfe durch nachhaltige Gestaltung von Konsum und Produktion senken.....	79
5	Modernisierung der Energieversorgung vorantreiben und Innovationen fördern: die Gestaltung des Technologieumbaus.....	82
	Handlungsfeld 12: Stromversorgung schnellstmöglich auf hundert Prozent erneuerbare Energien umstellen.....	82
	Handlungsfeld 13: Einen schnellen und systemdienlichen Markthochlauf für Wasserstoff und SynFuels ermöglichen.....	84
	Handlungsfeld 14: Wärmeversorgung klimaneutral gestalten.....	87
	Handlungsfeld 15: Den technologischen Wandel für einen klimaneutralen Verkehrssektor vorantreiben.....	89
6	Prozesse umstellen und Ressourcen schonen: Strategien zur klimaneutralen Industrie.....	94
	Handlungsfeld 16: Klimaneutrale Prozesse	95
	Handlungsfeld 17: Aufbau einer Kreislaufwirtschaft.....	98
	Handlungsfeld 18: Materialeffizienz und Materialsubstitution fördern	99
	Handlungsfeld 19: Effektivität von CO ₂ -Preisen und Investitionssicherheit erhöhen	100
7	Kohlenstoffmanagement für einen Transformationspfad zu netto- negativen Emissionen	102
	Handlungsfeld 20: CDR – CO ₂ -aus der Atmosphäre entfernen	104
	Handlungsfeld 21: CCS – CO ₂ in geologischen Lagerstätten einlagern	108
	Handlungsfeld 22: CCU – Kohlenstoff klimaverträglich nutzen.....	109
	Fazit.....	111
	Literatur	113
	Das Akademienprojekt	118

Abkürzungen und Einheiten

BECCS	Bioenergie mit Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (bio energy with carbon capture and storage)
BECCU	Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
CBAM	Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment Mechanism)
CCS	Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (Carbon Capture and Storage)
CCU	Kohlendioxidabscheidung und -verwendung (Carbon Capture and Utilization)
CDR	Kohlendioxidentnahme aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal)
DACCS	Kohlendioxidentnahme aus der Luft mit anschließender Kohlendioxidspeicherung (Direct Air Capture and Storage)
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU-ETS	Europäischer Emissionshandel (European Emissions Trading System)
GW	Gigawatt
HVC	hochwertige Chemikalien (High Value Chemicals)
IPCC	Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LNG	Flüssigerdgas (liquefied natural gas)
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (Land Use, Land-Use Change and Forestry)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MW	Megawatt
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PV	Photovoltaik
RED	Erneuerbare-Energien-Richtlinie
SDG	Sustainable Development Goals
THG	Treibhausgase
TRL	Technologischer Reifegrad (Technology Readiness Level)
TW	Terawatt

Glossar

Agri-Photovoltaik	Gleichzeitige Nutzung von Flächen für die landwirtschaftliche Produktion und die Stromproduktion mittels Photovoltaik
aktive Mobilität	Auf Muskelkraft basierende Fortbewegungsarten, insbesondere Fahrradfahren und Zufußgehen
Backup-Kraftwerke	Flexibel einsetzbare Kraftwerke, die nicht der dauerhaften Stromerzeugung, sondern der Sicherung der Stromversorgung dienen. Sie kommen nur wenige Stunden im Jahr zum Einsatz, beispielsweise in einer Dunkelflaute, wenn zu wenig Strom aus Windenergie und Photovoltaik eingespeist wird.
BECCS – Bioenergy with Carbon Capture and Storage	Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung. Die Funktionsweise: Pflanzen nehmen durch Photosynthese CO ₂ aus der Atmosphäre auf und bilden daraus energiereiche Kohlenstoffverbindungen. Werden diese zur Erzeugung von Strom, Wärme oder Kraftstoff genutzt, wird dieses CO ₂ wieder freigesetzt, aber nicht in die Atmosphäre zurücklassen, sondern abgetrennt und dauerhaft unterirdisch gelagert. Dadurch wird der Atmosphäre netto CO ₂ entzogen.
Bestandsschutz	Regelungen in Gesetzen oder Verträgen, die für bereits bestehende Anlagen Ausnahmetatbestände von neu eingeführten rechtlichen Anforderungen schaffen. Beispielsweise können bei einer Verschärfung von Emissionsgrenzwerten diese nur für neu errichtete Anlagen gelten, während für Altanlagen im Sinne des Bestandsschutzes weiterhin die Grenzwerte gelten, die bei der Zulassung der Anlage gültig waren.
blauer Wasserstoff	Mit Dampfreformierung aus Erdgas hergestellter Wasserstoff, wobei das entstehende CO ₂ abgetrennt und unterirdisch eingelagert wird (CCS)
CCS – Carbon Capture and Storage	Kohlendioxidabscheidung und -speicherung. CO ₂ wird aus Energie- oder Industrieanlagen abgetrennt und dauerhaft unterirdisch eingelagert. Als Speicher kommen vor allem leergeförderte Erdöl- und Erdgaslagerstätten sowie tiefliegende, salzwasserführende Aquifere infrage.
CCU – Carbon Capture and Utilization	Kohlendioxidabscheidung und -verwendung. CO ₂ wird beispielsweise aus einem Industrieprozess abgetrennt, um es in chemischen Prozessen zu verwenden. Ein Beispiel sind sogenannte Synfuels, synthetische Kraftstoffe, die aus Wasserstoff und CO ₂ hergestellt werden. Mit CCU können verschiedene kohlenstoffhaltige Produkte hergestellt werden, beispielsweise Kunststoffe und Chemikalien. Das CO ₂ ersetzt Erdöl oder Erdgas als Kohlenstoffquelle.
Carbon Contracts for Difference (CCfDs)	Differenzkontrakte für CO ₂ sind ein Instrument, das genutzt werden kann, um klimafreundliche Technologien in der Industrie gegenüber konventionellen, klimaschädlichen Technologien wettbewerbsfähig zu machen. Die Funktionsweise: Ein Unternehmen, das auf eine klimafreundliche Technologie umstellen möchte, schließt einen CCfD mit dem Staat ab. Darin wird ein festgelegter CO ₂ -Preis für die Laufzeit der neuen Anlage vereinbart, der möglichst den CO ₂ -Vermeidungskosten des Unternehmens entsprechen sollte. Ist der Marktpreis für Emissionszertifikate niedriger als der vereinbarte CO ₂ -Preis, zahlt der Staat dem Unternehmen die Differenz. Liegt der Marktpreis über dem vereinbarten CO ₂ -Preis, zahlt das Unternehmen die Differenz an den Staat.

DACCS – Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage	CO ₂ -Entnahmetechnologie, bei der CO ₂ in technischen Anlagen mit chemischen Bindemitteln aus der Umgebungsluft aufgefangen wird. Das CO ₂ wird dann komprimiert und unterirdisch eingelagert.
dargebotsabhängige erneuerbare Energien	Erneuerbare Energien, die vom Wetter abhängig sind, vor allem Windenergie und Solarenergie
Endenergie	Energie, die von den Endverbraucherinnen und -verbrauchern (Haushalte, Gewerbe, Industrie) verwendet wird, zum Beispiel Strom, Benzin und Heizöl. Die Endenergie entspricht der für die Herstellung der Endenergieträger eingesetzten Primärenergie abzüglich der Transport- und Umwandlungsverluste.
Feedstocks	Als Feedstocks werden hier chemische und biogene Energieträger (Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe) bezeichnet, die nicht zur Energiebereitstellung, sondern rohstofflich genutzt werden, etwa als Ausgangsstoffe zur Erzeugung von Kunststoffen oder Chemikalien. Heute werden größtenteils fossile Feedstocks wie Erdgas oder Raffinerienebenprodukte wie Naphta verwendet. Um sie zukünftig klimaneutral bereitzustellen, müssen Biomasse oder grüner Wasserstoff und darauf basierende synthetisch hergestellte Kohlenwasserstoffe genutzt werden. Für die Synthese der Kohlenwasserstoffe ist eine klimaneutrale Kohlenstoffquelle erforderlich.
Flexibilität (Stromversorgung)	Um trotz der schwankenden Einspeisung aus Wind- und Solarenergie Einspeisung und Entnahme im Stromnetz im Gleichgewicht zu halten, sind Technologien erforderlich, die die Schwankungen ausgleichen. Diese umfassen Speicher, flexibel betreibbare, schnell regelbare Kraftwerke sowie Verbraucherinnen und Verbraucher, die ihren Stromverbrauch zumindest teilweise in Zeiten mit hoher Wind- und Solarstromeinspeisung verschieben können.
Floating Photovoltaik	Schwimmende PV-Anlagenmodule, die auf ungenutzten Wasserflächen betrieben werden können
grauer Wasserstoff	Mit Dampfreformierung aus Erdgas hergestellter Wasserstoff. Im Gegensatz zu sogenanntem blauem Wasserstoff wird das entstehende CO ₂ nicht abgeschieden und unterirdisch eingelagert, sondern in die Atmosphäre entlassen. Es entstehen also CO ₂ -Emissionen. Heute wird Wasserstoff größtenteils mit diesem Verfahren hergestellt.
grüner Wasserstoff	Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energien. In den meisten Szenarien wird er mit Strom aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen per Elektrolyse hergestellt. Bei der Elektrolyse wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gepalten, dafür wird viel elektrische Energie benötigt.
Grenzausgleichsmechanismus	Ein CO ₂ -Grenzausgleichsmechanismus wird auch als „Klimazoll“ bezeichnet. Er dient dazu, durch eine CO ₂ -Bepreisung entstehende Nachteile im internationalen Wettbewerb auszugleichen und dadurch Abwanderung von Industrie in Regionen mit weniger ambitionierter Klimapolitik (Carbon Leakage) zu verhindern. Importierte Produkte werden dabei mit einer CO ₂ -Abgabe belegt, die dem auf die einheimische Produktion angewendeten CO ₂ -Preis entspricht. Auf EU-Ebene wird derzeit die Einführung eines Europäischen Grenzausgleichsmechanismus für Eisen, Stahl, Zement, Düngemittel, Aluminium und Strom diskutiert.

High Value Chemical (HVC)	Die Hauptprodukte des Steamcrackingverfahrens, Olefine und Aromaten, werden unter dem Begriff High Value Chemicals (hochwertige Chemikalien) zusammengefasst. Sie werden als sogenannte „Plattformchemikalien“ zur Herstellung von Kunststoffen, Lacken, Lösungsmitteln und anderen Produkten verwendet. Beim Steamcracking werden längerkettige Kohlenwasserstoffe, vor allem Naphtha aus Erdölraffinerien, aufgespalten. Um zukünftig HVC klimaneutral herzustellen, braucht es alternative Produktionsrouten basierend auf Wasserstoff und klimaneutral bereitgestelltem Kohlenstoff.
Interkonnektorkapazitäten	Leitungskapazität für grenzüberschreitende Stromübertragung. Interkonnektoren werden auch als Grenzkuppelstellen bezeichnet
Leistungsmärkte	Auf Leistungsmärkten wird nicht die erzeugte Strommenge vergütet, sondern die bereitgestellte Leistung. Die Vergütung erfolgt unabhängig davon, ob tatsächlich Strom eingespeist wurde. Leistungsmärkte werden auch als Kapazitätsmärkte bezeichnet.
Materialsubstitution	Ersatz eines problematischen – beispielsweise klimaschädlichen, teuren oder knappen – Materials durch ein anderes, weniger problematisches. Beispiele sind die Substitution von Zement und Stahl durch Holz in der Bauindustrie sowie der Ersatz von Zementklinker durch alternative Bindemittel in der Zementproduktion.
Mikromobilität	Fortbewegung mit Klein- und Leichtfahrzeugen, wobei diese elektrisch, konventionell oder nicht motorisiert sein können. Beispiele sind Fahrräder, Pedelecs, Tretroller, E-Scooter. Der Beitrag zur Emissionsreduktion im Güter- und Personenverkehr ist der Einsatz alternativ zu größeren Fahrzeugen oder ergänzend zum Schienenverkehr auf der „letzten Meile“.
Modal Shift	Verkehrsverlagerung. Im Sinne einer klimafreundlichen Mobilität wird eine Verlagerung weg vom motorisierten Individualverkehr (vor allem PKW) hin zum öffentlichen Verkehr und zur aktiven Mobilität (Fahrradfahren, Zufußgehen) angestrebt. Im Güterverkehr kann eine Verkehrsverlagerung von der Straße auf die Schiene sowie die Binnenschifffahrt zum Klimaschutz beitragen.
Negative Emissionen	CO ₂ -Entnahme aus der Atmosphäre, beispielsweise durch Bioenergie mit CCS oder Aufforstung. Die Gesamtemissionen sind netto-negativ, wenn insgesamt mehr CO ₂ aus der Atmosphäre entnommen als ausgestoßen wird (der CO ₂ -Gehalt der Atmosphäre also gesenkt wird).
Ökosystemdienstleistungen	Nutzen, den Menschen von Ökosystemen beziehen. Beispiele sind die Bereitstellung von Wasser, die Reproduktion von Tieren und Pflanzen, die als Nahrungsmittel genutzt werden, die Bereitstellung von Baumaterialien (zum Beispiel Holz), Arzneimitteln sowie das Bestäuben von Nutzpflanzen durch Insekten. Auch eine ansprechende Umwelt, die Erholung und ästhetisches Vergnügen fördert, ist eine Ökosystemdienstleistung.
Parkraumbewirtschaftung	Zeitliche Beschränkung oder Erheben einer Gebühr für die Parkraumnutzung

Preissensitivitäten	Die Preissensitivität ist ein Maß dafür, wie stark Käuferinnen und Käufer eines Produktes auf Preisänderungen reagieren.
Prozessemissionen	Treibhausgasemissionen, die in Industrieprozessen bei der chemischen Umwandlung der Ausgangsstoffe in die Produkte entstehen. Der Begriff wird verwendet in Abgrenzung zu energiebedingten Emissionen der Industrie, die durch die Bereitstellung der für die Produktionsprozesse benötigten Energie (vor allem Strom- und Wärmeerzeugung) entstehen.
Rebound-Effekt	Energieeffizienzsteigerungen können zu Änderungen im Verbraucherverhalten führen, durch die die potenziell mögliche Energieeinsparung der Effizienzmaßnahme nicht erreicht wird. Dieser sogenannte Rebound-Effekt wird dadurch ausgelöst, dass die Effizienzsteigerung häufig mit Kosteneinsparungen aufseiten der Verbraucher*innen einhergeht. Ist die effizienter bereitgestellte Energiedienstleistung billiger, wird sie stärker nachgefragt. Dies bezeichnet man als direkten Rebound-Effekt. Ein indirekter Rebound-Effekt tritt ein, wenn das durch die Effizienzsteigerung eingesparte Geld für andere Produkte oder Dienstleistungen eingesetzt wird, die ebenfalls Energie verbrauchen.
Redispatch	Um drohende Netzengpässe zu beheben, weisen Netzbetreiber Kraftwerke und Speicher „vor“ und „hinter“ dem Netzengpass an, ihre Anlagenfahrpläne (Dispatch) anzupassen.
Residualemissionen	Nach Anwendung aller CO ₂ -Minderungsmaßnahmen verbleibende Restemissionen an Treibhausgasen, vor allem aus der Landwirtschaft und Industrie. Um Klimaneutralität zu erreichen, müssen diese nicht oder schwer vermeidbaren Restemissionen durch die CO ₂ -Entnahme aus der Atmosphäre („negative Emissionen“) ausgeglichen werden.
Re-Use	Wiederverwendung von Produkten am Ende ihrer Erstnutzung für den ursprünglich vorgesehenen Zweck. Beispiele sind Mehrwegbehälter und Second-Hand-Produkte. Hilfreich für die Verbreitung von Re-Use-Konzepten sind Langlebigkeit und Reparierbarkeit von Produkten.
Ridesharing	Fahrgemeinschaften und Mitfahrgelegenheiten, meist mit PKW
Ridepooling	Ridesharing, unterstützt durch digitale Systeme, die individuelle Routen verbinden
Sektorenkopplung	Die Sektorenkopplung (auch Sektorkopplung genannt) verbindet die Energiesektoren Strom, Wärme und Mobilität zu einem integrierten Energiesystem, um Haushalt, Gewerbe und Industrie mit den benötigten Energiedienstleistungen zu versorgen. Das Ziel der Sektorenkopplung ist, erneuerbare Energien, insbesondere Strom aus Windenergie und Photovoltaik, auch in der Wärmeversorgung und im Verkehrssektor sowie in der Industrie stärker zu nutzen. Technologien, die dabei zum Einsatz kommen, sind direkte Elektrifizierung (zum Beispiel Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen) und indirekte Elektrifizierung (Erzeugung von Wasserstoff oder Synfuels mit Strom, die dann in den entsprechenden Anwendungen statt fossiler Brenn- und Kraftstoffe zum Einsatz kommen).

Suffizienz	Suffizienz bezeichnet eine Strategie zur absoluten Reduktion von Konsum- und Produktionsniveaus bei gleichzeitiger Sicherung eines Mindeststandards, insbesondere durch soziale Innovationen und Veränderung sozialer Praktiken. Davon zu unterscheiden ist (Energie-)Effizienz, die eine relative Reduktion des Energieverbrauchs im Verhältnis zur bereitgestellten Energiedienstleistung bezeichnet.
Synfuels	Strombasierte synthetische Kraftstoffe. Für die Herstellung dieser Kraftstoffe dient Strom aus Windkraft oder Photovoltaik als Energiequelle. Die Funktionsweise: Durch Elektrolyse wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Für diesen energieintensiven Prozess wird Strom benötigt. Der Wasserstoff wird dann in einem weiteren Prozessschritt mit CO ₂ zu kohlenstoffhaltigen Verbindungen wie Methan oder flüssigen Kraftstoffen weiterverarbeitet. Synfuels werden auch als E-Fuels bezeichnet.
Technology Readiness Level (TRL)	Der Technologiereifegrad ist eine Skala von 1 bis 9 zur Bewertung des Entwicklungsstandes neuer Technologien. Mit ihm lässt sich die Zeit bis zur Marktreife einer Technologie abschätzen.
Verteilungswirkung [bezogen auf CO₂-Bepreisung]	Die Verteilungswirkung beschreibt, wie sich politische Maßnahmen, hier die CO ₂ -Bepreisung, auf die Einkommens- und Vermögensverteilung in der Bevölkerung auswirkt. Je nach Ausgestaltung einer Maßnahme können verschiedene Bevölkerungsgruppen unterschiedlich stark be- oder entlastet werden.
Windfallprofite	Zufallsgewinn, der unverhofft durch Ereignisse entsteht, die vom Unternehmen nicht beeinflusst werden können und zu einer plötzlichen und unerwarteten Veränderung der Marktlage führen

Zusammenfassung

Um die aktuellen Klimaziele für Deutschland erreichen zu können, müssen in allen Sektoren gleichzeitig tiefgreifende Maßnahmen ergriffen werden.

1. Heutige **Energieverbrauchsmuster** erfordern Ausbauraten für erneuerbare Energien und weitere Technologien, die in der benötigten enormen Geschwindigkeit sehr schwer umzusetzen sind. Über Effizienzsteigerungen hinaus muss daher auch die Nachfrage nach Energiedienstleistungen an sich sinken.
2. **Die Reduktion der Nachfrage erfordert politische Gestaltung** durch geeignete Rahmenbedingungen, die über eine reine CO₂-Bepreisung hinausgehen. Wichtig für eine sozial ausgewogene Transformation ist es, **gute klimafreundliche Alternativen** für Wohnen und Mobilität zu schaffen.
3. **Klimaneutrale Produktion** und **nachhaltiger Konsum** müssen Hand in Hand gehen: Lange und gemeinsame Produktnutzung, Wiederverwendung und Aufarbeitung mindern den Bedarf an Produkten; neue Produktionsprozesse mit grünem Wasserstoff und Strom, Materialkreisläufe sowie CO₂-freie Grundstoffe machen deren Herstellung klimaneutral.
4. Ein **schneller Umbau der Energieversorgung auf hundert Prozent Erneuerbare, umfassende direkte Elektrifizierung sowie der Hochlauf von Wasserstoffproduktion und -importen** sind zweifellos erforderlich, auch bei reduziertem Energieverbrauch.
5. Restemissionen müssen durch **CO₂-Entnahmen aus der Atmosphäre** ausgeglichen werden. Hierfür, ebenso wie für die Abscheidung unvermeidbarer Prozessemissionen in der Industrie, sollte die **geologische Speicherung von CO₂** neu diskutiert werden.

Methodisches Vorgehen und Schwerpunktsetzung

Gemäß der aktuellen Fassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes soll Deutschland im Jahr 2045 Netto-Treibhausgasneutralität erreichen. Ziel der dargestellten Untersuchung war, Transformationspfade aufzuzeigen, wie dies gelingen kann. Der Fokus der Analyse liegt dabei auf dem deutschen Energiesystem, wobei sowohl die Einbettung in den europäischen Kontext als auch der Import von Wasserstoff und anderen strombasierten Energieträgern berücksichtigt wird.

Den im Folgenden dargestellten Ergebnissen liegen drei methodische Ansätze zugrunde:

1. eigene Modellrechnungen,
2. eine systematische Auswertung bestehender Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland und
3. Expertendiskussionen in einer interdisziplinär zusammengesetzten Arbeitsgruppe.

Für die **eigenen Modellrechnungen** kam das am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme entwickelte Energiesystemmodell REMod zum Einsatz. Die parallel durchgeführte **Auswertung bestehender Klimaneutralitätsszenarien aus sieben deutschen Studien** dient zusätzlich dazu, die Ergebnisse der eigenen Berechnungen einzuordnen und herauszuarbeiten, in welchen Bereichen unter Expert*innen weitgehend Einigkeit bezüglich zentraler Aspekte des Transformationspfades zur Klimaneutralität herrscht und in welchen Bereichen die Ansichten stärker divergieren, also noch größere Unsicherheit herrscht, welche Technologien erfolgversprechend sind.¹ Des Weiteren werden Erkenntnisse abgeleitet für Bereiche, die durch die Berechnungen mit REMod nicht abgedeckt werden; dies sind vor allem Prozessemissionen in der Industrie sowie CO₂-Entnahmetechnologien zum Ausgleich schwer vermeidbarer Residualemissionen. Im Rahmen der **Expert*innendiskussion** wurden die Ergebnisse aus eigenen Szenarien und Metaanalyse reflektiert und basierend auf der Gesamtschau der Szenarien Vorschläge zu politischen Maßnahmen und Instrumenten abgeleitet.

Der Fokus der Untersuchung liegt auf den folgenden Aspekten:

1. der **Bedeutung einer Nachfragereduktion** für das Erreichen der Klimaziele,
2. dem Beitrag eines **beschleunigten Technologiehochlaufs** für die Zielerreichung,
3. der Frage, unter welchen Annahmen eine **klimaneutrale Energieversorgung bereits vor 2045** möglich ist,
4. den erforderlichen Strategien zur Umsetzung von Klimaneutralität in der **industriellen Produktion** sowie
5. dem Beitrag von **netto-negativen** Emissionen zur Klimaneutralität.

¹ Allerdings ist zu beachten, dass es sich bei diesen Transformationspfaden in der Regel um szenariobasierte Projektionen handelt (also „was-wäre-wenn-Rechnungen“), nicht um Prognosen.

Bestehende Szenarienstudien untersuchen kaum, inwieweit eine **Reduktion der Nachfrage** nach Energiedienstleistungen Spielräume schaffen kann, um Zielverfehlungen beim Technologieausbau auszugleichen oder die Klimaziele gar einige Jahre früher zu erreichen. Daher wurde dies in den eigenen Modellrechnungen adressiert. Hierzu wurden für die Nachfragereduktion und auch für den **schnelleren Technologiehochlauf** bewusst extreme Annahmen gewählt, um den gesamten Möglichkeitsraum von Transformationspfaden auszuloten.

Vor dem Hintergrund der Feststellung, dass die bisherigen nationalen Klimaziele der Staaten in der Summe nicht ausreichen, um die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens zu erfüllen, sollte dringend die Möglichkeit geschaffen werden, ein klimaneutrales Energiesystem in Deutschland bereits vor 2045 zu erreichen. Auch dies war daher Gegenstand der Untersuchung in entsprechenden Modellrechnungen für eine **klimaneutrale Energieversorgung bereits im Jahr 2040**. Hier konnte in dem Energiesystemmodell nur dann überhaupt ein möglicher Transformationspfad gefunden werden, wenn entweder eine sehr starke Reduktion der Nachfrage angenommen wird oder ein gegenüber dem Hauptszenario – welches bereits ambitionierte Ausbauraten zugrunde legt – noch weiter beschleunigter Technologiehochlauf vorausgesetzt wird. Diese Modellrechnungen sollten allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass der Weg zur Klimaneutralität unabhängig vom angestrebten Zeitpunkt der Zielerreichung erhebliche Anstrengungen und einen umfassenden Wandel erfordert.

Um in Deutschland ein CO₂-Budget einzuhalten, das bei einer globalen Pro-Kopf-Gleichverteilung mit dem **1,5-Grad-Celsius-Ziel konform** ist, müssten die Emissionen bereits bis 2035 auf nahezu null sinken. Auch dies wurde in einem zusätzlichen Szenario modelliert und führte nur unter der Annahme einer noch weiter erhöhten Umbaugeschwindigkeit sowie schneller erfolgenden Reduktion der Energienachfrage zu einer Lösung. Die für dieses Szenario ermittelten Ausbauraten und Umbaugeschwindigkeiten wurden in den Expert*innendiskussionen der Arbeitsgruppe als nicht oder kaum erreichbar eingeschätzt. Dies gilt ebenso für die Umsetzung der erforderlichen Verhaltensänderungen in der Breite der Gesellschaft im erforderlichen Tempo.

Neben dem beschleunigten Umbau des Energiesystems macht das Ziel der Klimaneutralität es auch erforderlich, Prozessemissionen aus der Industrie und Treibhausgase aus der Landwirtschaft stärker in den Blick zu nehmen und diese so weit wie möglich zu reduzieren. Da sich trotz aller Anstrengungen Restemissionen nicht vermeiden lassen, müssen diese durch **CO₂-Entnahme** aus der Atmosphäre ausgeglichen werden. Die gesonderte und fokussierte Betrachtung der Optionen für netto-negative Emissionen bildeten daher ebenso einen wichtigen Schwerpunkt der Arbeitsgruppe.

Kernbotschaft 1: Die Transformation zur Klimaneutralität erfordert eine umfassende gesellschaftliche und politische Neuausrichtung.

Der Umstieg auf eine klimaneutrale Lebens- und Wirtschaftsweise innerhalb von wenigen Jahrzehnten ist von existenzieller Bedeutung für den Erhalt unserer Lebensgrundlagen. Die erforderliche Tiefe der Transformation kann nur durch das Ineinandergreifen gesellschaftlicher, technischer und ökonomischer Lösungsansätze erreicht werden. Hierfür sind übergreifende Maßnahmenbündel erforderlich, die CO₂-vermeidende Technologien und Verhaltensweisen grundsätzlich fördern und so die Transformation ermöglichen.

Übergreifende Handlungsoptionen: Handlungsfelder (HF)

HF 1: Zielbegriff und Lösungsraum für eine nachhaltige Energiewende erweitern

Klimaneutralität kann nur gelingen, wenn regenerative statt fossiler Ressourcen genutzt und Materialkreisläufe geschlossen werden, wenn die Energie- und Materialeffizienz erhöht wird und auch der Bedarf an Energiedienstleistungen reduziert wird. Dies gilt insbesondere, wenn neben den Klimaeffekten weitere ökologische Belastungsgrenzen sowie die globalen Auswirkungen des Energie- und Ressourcenverbrauchs berücksichtigt werden.

HF 2: Energiewende als gesellschaftlichen Prozess gestalten

Die Energiewende als technologische Transformation zu betrachten, greift zu kurz. Es geht gleichermaßen um die gesellschaftliche, soziale und kulturelle Gestaltung der Zukunft. Ziel muss es sein, eine hohe Lebensqualität mit langfristiger ökologischer Tragfähigkeit in Einklang zu bringen. Politische Rahmenbedingungen sollten darauf abzielen, klimaschonendes Verhalten zur naheliegendsten Option zu machen und Suffizienz aktiv zu fördern. Transparente Prozesse, Mitgestaltungsmöglichkeiten und eine als gerecht empfundene Verteilung von Nutzen und Lasten sind dabei zentral für die Akzeptanz.

HF 3: „Getting the Price Right“ für Klimaneutralität

Um fossile Energieträger zu verdrängen, ist eine ausreichend hohe CO₂-Bepreisung in allen Sektoren essenziell. Da CO₂-Preise aus Gründen des Bestandsschutzes und der Planbarkeit in der Regel auf moderatem Niveau beginnen und dann ansteigen, kann für Technologien, die noch am Anfang ihrer Entwicklung stehen und daher zu Beginn der Transformation noch teurer sind, zusätzliche Förderung erforderlich sein. Dabei sollte auch den Ausstieg aus der Förderung von Beginn an mitgedacht werden. Außerdem ist wichtig, dass der zukünftige Anstieg des CO₂-Preises für Unternehmen absehbar ist. Differenzkontrakte (Carbon Contracts for Difference – CfD) können für Unternehmen die Planbarkeit erhöhen und neue Technologien in der Markteinführungsphase unterstützen. Bestehende Subventionen für die Nutzung fossiler Energieträger konterkarieren die CO₂-Preise und sollten abgebaut werden.

HF 4: Wichtige Netzinfrastrukturen rechtzeitig ausbauen

Netzinfrastrukturen müssen aufgrund ihrer langen Lebensdauern und Planungszeiträume vorausschauend ausgebaut werden. Insbesondere bei Übertragungs- und Verteilernetzen für Strom besteht ein erhebliches Defizit im Ausbau der Infrastrukturen und somit ein starker Netzausbaubedarf. Die zunehmende Sektorenkopplung macht dabei einen übergreifenden Systementwicklungsplan erforderlich, der auf die integrierte Entwicklung der Strom-, Erdgas-, Wasserstoff- und CO₂-Netze abzielt. Hierbei ist eine enge europäische Zusammenarbeit erforderlich. Wichtig wäre es zudem, Wege zu finden, um die vielfältigen Hemmnisse für den Ausbau der Netze zu überwinden, die jeweils vor Ort durch lokale Widerstände entstehen.

Übergreifende Handlungsoptionen: Handlungsfelder (HF)**HF 5: Transparente und verlässliche Leitplanken für den Einsatz von Elektrifizierung, Wasserstoff, PtX und Biomasse setzen**

Erneuerbarer Strom, grüner Wasserstoff und dessen Derivate sowie Biomasse können in vielen Fällen als Alternativen zueinander eingesetzt werden. Energieszenarien legen nahe, dass ein hoher Anteil an direkter Elektrifizierung zu einem effizienteren und kostengünstigeren Gesamtsystem führt. Die begrenzten Potenziale an nachhaltig erzeugbarer Biomasse und an klimaneutralem Wasserstoff sollten vorrangig in denjenigen Bereichen eingesetzt werden, in denen keine direktelektrische Alternative zur Verfügung steht: bestimmte Industrieprozesse, Schiffs- und Luftverkehr sowie teilweise Schwerlastverkehr. Bei Biomasse ist die rohstoffliche Nutzung der energetischen vorzuziehen.

HF 6: Energiewendekompetenzen bei Fachkräften erweitern und Informationen frei bereitstellen

Eine Ausbildungsinitiative für Berufe im handwerklichen und technischen Bereich könnte die Kapazität an Fachkräften, welche zur Umsetzung der Transformation dringend gebraucht werden, erhöhen. Fortbildungsangebote können dazu beitragen, Installateur*innen und Berater*innen auf dem aktuellen Stand des Wissens zu halten. Dies ist unter anderem wichtig, da sie private Kaufentscheidungen (zum Beispiel bei Heizungssystemen) oft erheblich beeinflussen. Ergänzend können Informationskampagnen, die auch Suffizienzoptionen einbeziehen, Bürger*innen bei der Entscheidungsfindung im Wohn-, Mobilitäts- und Konsumbereich unterstützen.

HF 7: Wirksamkeit von Maßnahmen kontinuierlich überprüfen

Um bis 2045 klimaneutral zu werden, muss die Transformation in allen Sektoren gleichzeitig und mit hoher Geschwindigkeit vorangetrieben werden. Sich zunächst nur auf kostengünstige Maßnahmen zu konzentrieren, ist nicht mehr ausreichend. Ein System aus Frühindikatoren kann helfen, Zielverfehlungen frühzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Tabelle 1: Übergreifende Handlungsoptionen: Handlungsfelder (HF)

Kernbotschaft 2: Die Klimaziele sind ohne Nachfrageänderungen kaum erreichbar

Die Modellrechnungen zeigen, dass eine maßgeblich auf technologische Lösungen fokussierte Strategie extrem hohe Anforderungen an den Umfang und die Geschwindigkeit der Transformation stellt und darüber hinaus den Einsatz besonders teurer Technologieoptionen erfordert. Ein Beispiel hierfür ist die besonders schnelle und tiefe Sanierung des kompletten Gebäudebestandes. Eine solche rein technologisch gedachte Transformation unter Beibehaltung aktueller Verbrauchsmuster beinhaltet enorme Pfadrisiken in ihrer Umsetzung, darüber hinaus aber auch hohe Anforderungen an Randbedingungen wie Verfügbarkeiten von Importen, Flächen oder anderen Ressourcen. Es bedarf daher über den technologischen Umbau hinaus einer aktiven Suffizienzpolitik, die klimafreundliche Verhaltensmuster fördert und Rahmenbedingungen für eine deutliche Reduktion des Bedarfs an Energiedienstleistungen schafft. Dies sollte nicht interpretiert werden als eine Nachfragereduktion durch einen vor allem mittels Preissignalen angereizten individuellen „Verzicht“. Vielmehr sollten Rahmenbedingungen geschaffen werden, die sich an den Bedürfnissen der Menschen orientieren, für alle Menschen zugängliche klimafreundliche Alternativen schaffen und so positive Nebeneffekte über die Nachfragereduktion hinaus erzielen können. Dabei können vor allem neue Konzepte in den Bereichen Wohnen, Mobilität, Konsum und Produktion einen Beitrag leisten.

Rahmenbedingungen für Verbrauchsreduktion politisch gestalten: Handlungsfelder (HF)

HF 8: Wissenschaftliche Forschung zur Integration von Verbrauchsreduktionsstrategien stärken

Bisher werden Suffizienzstrategien in Transformationsszenarien für Deutschland kaum berücksichtigt. Gerade in der Politikberatung sollten sie stärker berücksichtigt werden, um Potenziale, Grenzen und Zeitskalen von Verbrauchsreduktionen zu quantifizieren und Handlungsoptionen zu erarbeiten.

HF 9: Mobilität neu denken

Bisher haben Effizienzgewinne durch technischen Fortschritt im Verkehrssektor nicht zu einer Abnahme der CO₂-Emissionen geführt, da gleichzeitig der Verkehrsaufwand im Personen- und Güterverkehr gestiegen ist und Fahrzeuggröße und -gewicht zugenommen haben. Daher ist eine über den technologischen Wandel hinausgehende ganzheitliche Strategie erforderlich, die Mobilität als Zugang zu Zielen (unter anderem Arbeitsplatz, sozialen Aktivitäten, Einkaufsmöglichkeiten) definiert und darauf abzielt, den motorisierten Individualverkehr zu reduzieren – durch Stärkung eines qualitativ ansprechenden ÖPV, Rad- und Fußverkehrs, aber auch durch eine entsprechende Ausrichtung der langfristig wirkenden Stadtplanung und Siedlungspolitik. Eine Regionalisierung von Wirtschaftskreisläufen könnte dazu beitragen, den Güterverkehr zu reduzieren.

HF 10: Wohnqualität, Flächennutzung und Klimaanpassung in den Fokus nehmen

Im Gebäudesektor sind neben den Heizungssystemen auch der Ressourcenverbrauch und „graue“ Emissionen der Baumaterialien, also die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung des Materials entstehen, sowie Flächenverbrauch und -versiegelung relevant für die Umweltbilanz. Eine Umkehr des Trends zur steigenden Pro-Kopf-Wohnfläche ist ein zentraler Hebel zur Verbesserung der Klima- und Umweltbilanz des Gebäudesektors. Eine flexiblere Nutzung des Gebäudebestands, beispielsweise durch altersgerechte Modernisierungen oder Angebote zum Tausch von Wohnungen, sowie eine stärkere Nutzung von Gemeinschaftsflächen können hierzu beitragen. Dies wird nur langfristig erreichbar sein, die entsprechenden politischen Weichenstellungen sind aber zeitnah zu stellen. Auch die Anpassung an steigende Temperaturen und weitere Auswirkungen des Klimawandels ist bei langfristigen Konzepten für den Gebäudesektor zu berücksichtigen.

HF 11: Energiebedarfe durch nachhaltige Gestaltung von Konsum und Produktion senken

Eine konsequente Einpreisung von Klimaauswirkungen und anderen externen Effekten kann die Nachfrage nach klimaschädlichen Produkten reduzieren. Politische Rahmensetzungen können dafür sorgen, dass klimafreundliche Alternativen für alle Bevölkerungsgruppen zugänglich sind. Eine transparente und einfache Kennzeichnung der Klimawirkung von Produkten sowie Anreize zur Langlebigkeit und Reparierbarkeit von Produkten können hierzu beitragen.

Tabelle 2: Rahmenbedingungen für Verbrauchsreduktion politisch gestalten: Handlungsfelder (HF)

Kernbotschaft 3: Der technologische Umbau muss erheblich beschleunigt werden

Sowohl die ausgewerteten Szenarienstudien als auch die eigenen Modellrechnungen zeigen, dass eine erhebliche Beschleunigung des Ausbaus verschiedener Technologien erforderlich ist, um Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen. Die erforderlichen Ausbauraten für Windenergie und Photovoltaik, Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff und Synfuels, Elektromobilität, Wärmepumpen und Gebäudesanierung liegen teilweise an der Grenze dessen, was Expert*innen aktuell für erreichbar halten. Selbst bei einem starken Nachfragerückgang, unter anderem basierend auf umfassenden Suffizienzmaßnahmen, muss der Technologieausbau sehr schnell erfolgen. Umso wichtiger ist es, die effizientesten Systemlösungen zügig umzusetzen.

Modernisierung der Energieversorgung: Handlungsfelder (HF)

HF 12: Stromversorgung schnellstmöglich auf hundert Prozent erneuerbare Energien umstellen

Die Stromversorgung sollte bis 2035 nahezu vollständig auf erneuerbare Energie umgestellt werden. Dazu muss zum einen der Ausbau von Windenergie und Photovoltaik stark beschleunigt werden. Zum anderen müssen Stromnetze und Speicher ausgebaut werden, um die Integration der Erneuerbaren zu optimieren. Neben finanziellen Rahmenbedingungen, die Investitionen in benötigte Technologien attraktiv machen, ist es erforderlich, Planungs- und Genehmigungsverfahren zu beschleunigen und ausreichend Flächen für den Ausbau zur Verfügung zu stellen.

HF 13: Einen schnellen und systemdienlichen Markthochlauf für Wasserstoff und Wasserstoffderivate ermöglichen

Ein schneller Markthochlauf für Wasserstoff ist vor allem wichtig, um die Klimaziele für die Industrie zu erreichen. Dazu müssen sowohl eine heimische Wasserstoffproduktion als auch Importbeziehungen und -infrastrukturen aufgebaut werden. Bis bei der Elektrolyse die zu erwartenden Kostensenkungen durch Skaleneffekte erreicht sind und sich ein liquider Markt für grünen beziehungsweise emissionsarmen Wasserstoff etabliert hat, wird eine angebotsseitige und nachfrage-seitige Förderung der Wasserstoffproduktion und -nutzung erforderlich sein. Wasserstoffderivate wie Methanol werden zukünftig als Kraftstoffe vor allem im internationalen Flug- und Seeverkehr, aber auch als Rohstoffe für die chemische Industrie benötigt werden. Neben Wasserstoff ist für ihre Herstellung langfristig eine klimaneutrale Kohlenstoffquelle erforderlich. Die betrachteten Szenarien stimmen darin überein, dass der deutsche Bedarf an Wasserstoffderivaten hauptsächlich aus Importen gedeckt werden wird.

HF 14: Wärmeversorgung klimaneutral gestalten

Bessere Rahmenbedingungen für den Ausbau zentraler und dezentraler Wärmepumpen, eine Erhöhung der Sanierungsrate, Ausbau von Wärmenetzen, ein verpflichtender Anschluss für Abwärmepotenziale und die Nutzung von tiefer Geothermie sind wichtige Voraussetzungen für eine klimaneutrale Wärmeversorgung. Eine verpflichtende kommunale Wärmeplanung, wie im Koalitionsvertrag bereits vorgesehen, ist ein zentrales Instrument, um eine effiziente, langfristige Strategie für die Wärmeversorgung unter Berücksichtigung der jeweiligen Bedingungen vor Ort zu entwickeln. Sie sollte daher zügig eingeführt werden.

HF 15: Den technologischen Wandel für einen klimaneutralen Verkehrssektor vorantreiben

Zentraler Bestandteil klimaneutraler Mobilität ist eine Verlagerung weg vom Pkw- hin zum Fahrradverkehr, Fußverkehr und ÖPV. Dafür ist im urbanen Raum eine Umverteilung des Verkehrsraums erforderlich. Im Pkw-Bereich sollte ein schneller Umstieg auf batterieelektrische Fahrzeuge ambitioniert vorangetrieben werden. Unerlässlich ist dafür der weitere Ausbau der Ladeinfrastruktur, aber auch eine konsequente Erschließung von Potenzialen zur Effizienzsteigerung bei Elektrofahrzeugen. Beim Güterverkehr ist eine enge europäische Abstimmung erforderlich. Auch hier kommen prinzipiell direktelektrische Optionen in Form batteriebetriebener Fahrzeuge oder Oberleitungssysteme infrage. Des Weiteren sollte der Güterverkehr so weit wie möglich auf die Schiene verlagert werden. Dazu sind Investitionen ins europäische Schienennetz sowie dessen umfassende Digitalisierung erforderlich. Im internationalen Schiffs- und Flugverkehr können SynFuel-Quoten den Beginn der Marktdiffusion klimaneutraler Kraftstoffe ermöglichen, die langfristig notwendig ist.

Tabelle 3: Modernisierung der Energieversorgung: Handlungsfelder (HF)

Kernbotschaft 4: In der Industrie ist der Dreiklang aus klimaneutralen Prozessen, Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz nötig

Aufgrund der Langlebigkeit der Produktionsanlagen und der Anforderungen des globalen Wettbewerbs ist Klimaneutralität bis 2045 für den Industriesektor eine besonders große Herausforderung. Um Produktionsverlagerungen in Regionen mit niedrigeren Klimaschutzanforderungen zu verhindern, sind gesamteuropäische regulatorische Lösungen erforderlich.

Strategien zur klimaneutralen Industrie: Handlungsfelder (HF)

HF 16: Klimaneutrale Prozesse

Da etwa ein Drittel der Industrieemissionen auf Prozessemissionen zurückgeht, reicht es nicht, lediglich fossile durch erneuerbare Energieträger zu ersetzen. Vielmehr müssen Prozesse komplett umgestellt werden. Beispielsweise muss in der Stahlerzeugung die Hochofenroute durch Direktreduktion mit Wasserstoff ersetzt werden. Fossile Grundstoffe, beispielsweise Erdgas und Erdöl für die Kunststoffherzeugung, müssen langfristig durch biogene oder mit grünem Wasserstoff und aus der Atmosphäre entnommenem CO₂ hergestellte Alternativen ersetzt werden. Um Neuinvestitionen in klimaneutrale Prozesse anzureizen, sind geeignete Instrumente erforderlich, beispielsweise Carbon Contracts for Difference oder Investitionsförderungen. Emissionen, die sich auf diesem Weg nicht vermeiden lassen, vor allem in der Zementindustrie, müssen durch den Einsatz von Kohlenstoffabscheidung und -speicherung aufgefangen oder durch negative Emissionen ausgeglichen werden. Wird das aufgefangene CO₂ zur Herstellung von Produkten verwendet, ist die Gesamtkette nur dann klimaneutral, wenn es sich um sehr langlebige Produkte handelt, der Kohlenstoff durch Recycling sehr lange im Kreislauf gehalten wird oder das CO₂ am Ende der Produktlebensdauer bei der thermischen Verwertung abgeschieden und geologisch gespeichert wird.

HF 17: Aufbau einer Kreislaufwirtschaft vorantreiben

Der Aufbau einer Kreislaufwirtschaft kann den Ressourcenverbrauch und die industriellen Emissionen erheblich reduzieren. Zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft steht der Politik ein breites Instrumentarium zur Verfügung. Um Stoffkreisläufe zu schließen und ein effizientes Recycling zu ermöglichen, könnten Hersteller gesetzlich verpflichtet werden, Produkte so zu konzipieren, dass sie einfach in ihre Bestandteile zerlegbar und diese gut recycelbar sind. Auch Rücknahmeverpflichtungen für Hersteller und verbesserte Sammel- und Logistiksysteme könnten die Rohstoffbasis für die Sekundärproduktion verbessern. Quoten für die Verwendung von Sekundärmaterialien bei der Produktion können den Bedarf an Primärrohstoffen reduzieren.

HF 18: Materialeffizienz und Materialsubstitution fördern

Eine Kennzeichnungspflicht für den CO₂-Fußabdruck über alle Lebensphasen eines Produktes würde Transparenz schaffen und klimafreundliche Konsumententscheidungen erleichtern. Im öffentlichen Sektor könnten Quoten oder verbindliche Vorgaben für eine nachhaltige Beschaffung eingeführt werden. Teilweise ist für die Verwendung klimafreundlicher Baustoffe eine Anpassung der Bau- und Produktnormen erforderlich.

HF 19: Effektivität von CO₂-Preisen und Investitionssicherheit erhöhen

Die bisherige kostenlose Zuteilung von CO₂-Zertifikaten an die Industrie birgt die Gefahr, dass sich die CO₂-Preise teils nur unzureichend in den Produktionskosten niederschlagen. Da viele Unternehmen im globalen Wettbewerb stehen, muss allerdings das Ziel, CO₂-Preise wirksamer zu machen, austariert werden gegen den Schutz vor Carbon Leakage, also die Abwanderung von Produktion in Regionen mit niedrigeren Klimaschutzanforderungen. Im Zeitraum bis 2030 könnten Carbon Contracts for Difference dazu beitragen, dass Unternehmen trotz der noch relativ niedrigen CO₂-Preise die Produktion auf klimaneutrale Verfahren umstellen. Auf EU-Ebene gilt es eine Ausgestaltung des Grenzausgleichsmechanismus zu entwickeln, auf den sich die Mitgliedsstaaten einigen können und der effektive Anreize für die Transformation der Industrie setzt.

Tabelle 4: Strategien zur klimaneutralen Industrie: Handlungsfelder (HF)

Kernbotschaft 5: CO₂-Entnahmen sind erforderlich, ersetzen jedoch nicht die CO₂-Vermeidung

Um unvermeidbare Emissionen auszugleichen und das Temperaturziel des Pariser Klimaschutzabkommens einzuhalten, wird es erforderlich sein, CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen. Die Strategie zur CO₂-Entnahme sollte europäisch abgestimmt in eine übergeordnete Kohlenstoffmanagement-Strategie eingebettet werden, die zusätzlich die geologische Speicherung fossiler CO₂-Emissionen (CCS), die nicht rechtzeitig im erforderlichen Maß heruntergefahren werden können, und die Nutzung von CO₂ (CCU) umfasst.

Hinsichtlich der Potenziale für die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre sowie der Kosten, Umweltrisiken und sozialen Auswirkungen der verschiedenen Verfahren bestehen teilweise noch erhebliche Unsicherheiten. Klimaschutzkonzepte sollten sich daher nicht in zu großem Umfang auf die CO₂-Entnahme verlassen und überall, wo eine Möglichkeit besteht, ist der CO₂-Vermeidung Vorrang einzuräumen. Die CO₂-Entnahme ersetzt somit nicht die Emissionsvermeidung.

Kohlenstoffmanagement für einen Transformationspfad zu netto-negativen Emissionen: Handlungsfelder (HF)

HF 20: CDR – CO₂-aus der Atmosphäre entfernen

Die Aussicht auf spätere CO₂-Entnahme (CDR) darf nicht dazu verleiten, bei der Emissionsvermeidung zu wenig ambitioniert zu sein, denn die CO₂-Entnahme ist mit zahlreichen Risiken und Unsicherheiten hinsichtlich Potenzialen, Kosten, ökologischen und sozialen Folgen sowie Permanenz der Speicherung behaftet. Eine gesetzliche Festlegung des angestrebten Verhältnisses zwischen Emissionsminderungen und CDR würde die Priorisierung der Treibhausgasvermeidung sicherstellen. Die verschiedenen Verfahren zur CO₂-Entnahme sollten dringend weiter erforscht, großtechnisch erprobt und in einem breiten gesellschaftlichen Diskussionsprozess unter Berücksichtigung ihrer Potenziale und Risiken bewertet werden. Da die Risiken, dass das eingespeicherte CO₂ wieder entweicht (zum Beispiel durch Waldbrände bei Aufforstung als CO₂-Senke), je nach Verfahren unterschiedlich hoch sind, sind geeignete Accounting-Regeln zu entwickeln. Um Verfahren, die sich noch in der Entwicklung befinden, den Markteinstieg zu ermöglichen, wird eine zeitlich begrenzte technologiespezifische Förderung notwendig sein.

HF 21: CCS – CO₂ in geologischen Lagerstätten einlagern

Vor einigen Jahren wurde CCS in erster Linie für CO₂ aus Kohle- oder Erdgaskraftwerken diskutiert. Heute steht es vor allem zur Diskussion, um einen Umgang mit schwer vermeidbaren Emissionen zu finden (unter anderem aus der Zementindustrie und der Abfallverbrennung) oder im Zusammenhang mit der CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre zum Ausgleich von Restemissionen an Treibhausgasen (vor allem aus der Landwirtschaft). Vor diesem Hintergrund sollte eine neue gesellschaftliche Debatte angestoßen werden, in welchem Umfang CCS in Deutschland umgesetzt werden und welche Lagerstätten genutzt werden sollen – zum Beispiel in Deutschland oder im europäischen Ausland, an Land oder unter dem Meer. Mit dem Aufbau einer europaweiten Speicher- und Transportinfrastruktur für CO₂ sollte zügig begonnen werden.

HF 22: CCU – Kohlenstoff klimaverträglich nutzen

Auch als Rohstoff beispielsweise für Kunststoffe muss fossiler Kohlenstoff ersetzt werden (Carbon Capture and Usage CCU). Als klimaneutrale Kohlenstoffquellen kommen Biomasse oder aus der Luft gewonnenes CO₂ infrage. Bei der Nutzung von CO₂ aus fossilen Rohstoffen ist die Gesamtkette hingegen nicht CO₂-neutral, da mit Ende der Produktlebenszeit das CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Unabhängig von der Kohlenstoffquelle spielt die Dauer der CO₂-Bindung eine wichtige Rolle, denn je länger diese ist, desto höher ist der Klimaschutznutzen. Anreize für CCU sollten daher am tatsächlichen Klimaschutznutzen ausgerichtet werden, nicht an der Nutzung von CO₂ per se.

Tabelle 5: Kohlenstoffmanagement für einen Transformationspfad zu netto-negativen Emissionen: Handlungsfelder (HF)

1 Einleitung

Die deutsche und europäische Energieversorgung befindet sich in einem Wandel, der sich stetig weiter beschleunigt – und noch schneller werden muss. Dies ergibt sich bereits aus der Neufassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes, welches einen nationalen Beitrag definiert, um global den Temperaturanstieg und die dadurch zu erwartenden verheerenden Konsequenzen für unsere Lebensgrundlagen zu begrenzen. Die Notwendigkeit einer umfassenden Transformation betrifft nicht nur die Energieversorgung, sondern alle Sektoren, und damit auch die industrielle Produktion. Die neueren Entwicklungen auf den europäischen Energiemärkten, die sich seit dem Beginn des Kriegs in der Ukraine deutlich verschärft haben, machen dies nur allzu deutlich.

Die **aktuelle Energiekrise** und die **Verknappung bei der Erdgasversorgung** können die Energiewende hemmen oder vorantreiben: Einerseits bieten hohe Energiepreise Anreize, den Verbrauch zu senken und damit die Nutzung fossiler Rohstoffe einzuschränken. Sie bieten zudem bessere Marktchancen für erneuerbare Energietechnologien. Andererseits besteht die Gefahr, dass Strategien und Investitionen zur kurz- und mittelfristigen Abwendung von Versorgungsengpässen und zur Abmilderung hoher Energiepreise die Emissionen erhöhen – beispielsweise, weil verstärkt Kohle russisches Gas ersetzt. Sie könnten sogar einen Lock-in in fossile Technologien bewirken, wenn neue Erdgasfelder erschlossen werden oder Regasifizierungsanlagen und Pipeline-Erweiterungen in einer Form gebaut werden, die nicht auf eine zukünftige Wasserstoffinfrastruktur abgestimmt ist. Des Weiteren binden Aktivitäten zur Abwendung der aktuellen Krise Kapital und weitere Ressourcen, die auch für die Transformation der Energieversorgung benötigt werden. Steigende Rohstoffpreise erschweren zudem die Produktion der benötigten Energietechnologien. Dies könnte den notwendigen schnellen Technologiehochlauf und weitere Aktivitäten wie beispielsweise die Gebäudesanierungen verlangsamen.

Diese Stellungnahme basiert auf einer umfangreicheren Analyse von Szenarien und Handlungsoptionen der klimaneutralen Energieversorgung und industriellen Produktion, die im Rahmen einer früheren ESYS-Arbeitsgruppe erstellt wurde. Die der Arbeit zugrunde liegende Fragestellung war, wie eine klimaneutrale Energieversorgung und klimaneutrale industrielle Produktion in Deutschland gelingen kann. Sie erweitert damit die Betrachtungen der ESYS-Arbeitsgruppe Sektorkopplung, die in der Analyse „Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems“² und der Stellungnahme „Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende“³ im Jahr 2017 formuliert wurden. Diese Arbeitsgruppe betrachtete eine Reduktion der CO₂-Emissionen von maximal neunzig Prozent gegenüber 1990 – Prozessemissionen in der industriellen Produktion waren nicht Teil der Untersuchungen. Die nun vorliegende Arbeit weitet den Blick und nimmt das Ziel

² Ausfelder et al. 2017.

³ acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1.

der Klimaneutralität unter Berücksichtigung der Industrieproduktion in den Blick. An einigen Stellen finden sich Anmerkungen, wie die neueren Implikationen der Energiepreiskrise die bisherigen Erkenntnisse ändern könnten.

Weitergehender als in vielen bestehenden Szenarienstudien zur Klimaneutralität, in denen eine konstante oder sogar steigende Nachfrage nach Energiedienstleistungen häufig exogen vorgegeben ist, werden in der Arbeit dieser ESYS-AG auch **nachfrageseitige Lösungen** zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen betrachtet. Dabei werden sowohl Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz als auch eine Reduktion der Nachfrage nach Energiedienstleistungen berücksichtigt. Dieser Fokus erfährt durch die jüngsten Bestrebungen, Abhängigkeiten von russischen Energieimporten zu verringern, eine verstärkte Aufmerksamkeit. Doch bereits vor diesen Entwicklungen wurde im 6. Sachstandsbericht des IPCC erstmals überhaupt ein Kapitel zur Nachfrageseite nach Energiedienstleistungen und sozialen Aspekten des Klimaschutzes eingefügt. Die Motivation, soziale und nachfragebezogene Aspekte in den IPCC-Bericht einzubeziehen, liegt in wissenschaftlicher Evidenz: Energieeinsparungen stehen nicht notwendigerweise im Konflikt mit Wohlbefinden und Lebensqualität, sondern können diese sogar fördern, wenn diese Aspekte beim Design der Maßnahmen, die zu der Energieeinsparung führen, berücksichtigt werden. Nachfragereduzierte Energieszenarien sind also mit einer nachhaltigen Entwicklung durchaus vereinbar. Des Weiteren erhöhen sie die Chance, planetare Grenzen nicht weiter zu überschreiten. Sie bergen weniger Umweltrisiken als viele angebotsseitige Technologien und reduzieren den Bedarf, CO₂ zu einem späteren Zeitpunkt wieder aus der Atmosphäre entfernen zu müssen (sogenannte negative Emissionen) – Letzteres geht mit vielen Herausforderungen und Unsicherheiten einher. Zudem können nachfrageseitige Lösungen auch kurzfristige Ziele zur Eindämmung des Klimawandels unterstützen. Trotz allem ist jedoch zu betonen, dass auch bei nachfrageseitigen Lösungen begrenzte Potenziale, teilweise lange Zeithorizonte und Herausforderungen (zum Beispiel soziale Akzeptanz, Konflikt mit bestehenden wirtschaftlichen Interessen, vielfältige Akteursstrukturen) hinsichtlich der Umsetzbarkeit bestehen. Es sind ambitionierte Strategien in allen Dimensionen der Systemtransformation nötig, um das Ziel Klimaneutralität erreichen zu können.

Der Fokus der Analyse liegt auf dem deutschen Energiesystem. Dieses ist jedoch eingebettet in den europäischen Kontext und kann daher nicht isoliert betrachtet werden. Viele der Handlungsoptionen zur Förderung der Energiewende müssen im europäischen regulatorischen Rahmen abgestimmt werden. Die hier formulierten Handlungsoptionen berücksichtigen dies.

Das **methodische Vorgehen** beinhaltet **eigene Modellrechnungen** ebenso wie die **systematische Analyse und den Vergleich bestehender Energieszenarien für die Erreichung von Klimaneutralität bis 2045 beziehungsweise 2050** sowie **Expert*innendiskussionen in einer interdisziplinär zusammengesetzten Arbeitsgruppe**. Das Vorgehen ist in Abbildung 1 dargestellt.

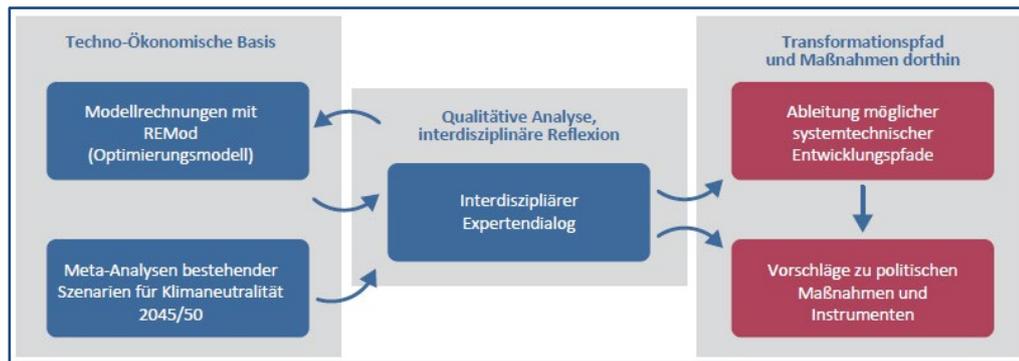


Abbildung 1: Methodisches Vorgehen der Arbeitsgruppe

Für die eigenen Modellrechnungen kam das Energiesystemmodell REMod zum Einsatz, das am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme entwickelt wurde. Das Modell ermittelt im Rahmen einer kostenbasierten Optimierung einen Zielpfad der Energiesystemtransformation, der ein vorgegebenes Budget für energiebedingte CO₂-Emissionen einhält. Dabei können Energieumwandlungen der Sektoren Industrie, Verkehr und Gebäude sowie der Umwandlungssektor in variabler Detailtiefe abgebildet werden. Das mit REMod berechnete Szenario wird im Folgenden als „ESYS KN2045“ bezeichnet und besteht aus einem Hauptszenario sowie weiteren Fokusbetrachtungen, die eine stärkere Absenkung des Endenergiebedarfs einerseits sowie einen schnelleren Markthochlauf relevanter Energietechnologien andererseits abbilden. Die Fokusuntersuchungen beleuchten Handlungsspielräume, die sich durch wesentlich stärkere Anstrengungen in den genannten Bereichen ergeben und bestehende Umsetzungsrisiken entlang des Transformationspfades verringern können.

Durch verbleibende und nicht vermeidbare Restemissionen vor allem aus der Landwirtschaft, der Abfallwirtschaft und einigen Industrieprozessen, zum Beispiel der Zementherstellung, ist Klimaneutralität nur zu erreichen, wenn **negative Emissionen** erzeugt werden. Deshalb nimmt dieses Thema hier einen vergleichsweise großen Raum ein. Es wird dargestellt, welchen Stellenwert die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre hat und welche Optionen hierfür bereitstehen.

Um die vielfältigen Maßnahmen umsetzen zu können, die im Rahmen der Szenarienanalysen als erforderlich für ein klimaneutrales Deutschland angesehen werden, müssen förderliche Rahmenbedingungen geschaffen und wichtige Weichen gestellt werden. Die vorliegende Stellungnahme zeigt **Handlungsoptionen** auf, die hierfür zur Verfügung stehen, und identifiziert Maßnahmen, die mit großer Wahrscheinlichkeit wichtige Beiträge zur Erreichung der Klimaneutralität leisten können. Kapitel 2 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Analyse zusammen, kontextualisiert somit die Handlungsoptionen und erläutert die Hintergründe. Anschließend werden übergreifende Handlungsoptionen zur Förderung der Energiewende (Kapitel 3) sowie speziellere Optionen in den Handlungsfeldern Nachfragereduktion (Kapitel 4), technologische Modernisierung des Energiesystems (Kapitel 5), Umstellung der industriellen Produktion (Kapitel 6) und schließlich Kohlenstoffmanagement durch netto-negative Emissionen (Kapitel 7) dargestellt.

2 Transformationspfade zu einer klimaneutralen Energieversorgung und Produktion

2.1 Vom Ende der Umwandlungskette her gedacht: die Energienachfrage

Die Entwicklung der Energienachfrage und deren wichtigste Einflussfaktoren wurden im Rahmen einer Metaanalyse untersucht (siehe Metaanalyse: Studienübersicht).

Metaanalyse: Studienübersicht

Neben den eigenen Modellrechnungen der AG werden die Szenarien von sieben deutschen Studien mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität analysiert und verglichen: Kohlenstoffdioxid aus der Verbrennung von Kohlen(wasser)stoffen fossilen Ursprungs steht vor diesem Hintergrund, wenn überhaupt, nur für einen befristeten Übergangszeitraum zur Verfügung.

- Umweltbundesamt (UBA) 2019 „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE-Studie“, kurz: *UBA 2019*⁴
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2021 „Leitstudie – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren“, kurz: *BMWi LFS3 2021*⁵
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2021 „Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann“, Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, kurz: *Agora 2021*⁶
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021 „dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität – Klimaneutralität 2045 – Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems“, kurz: *dena 2021*⁷
- Kopernikus-Projekt Ariadne 2021 „Ariadne-Report – Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 Szenarien und Pfade im Modellvergleich“, kurz: *Ariadne 2021*⁸
- Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) 2021 „KLIMAPFADE 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“, kurz: *BDI 2021*⁹
- Forschungszentrum Jülich 2021 „Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045“, kurz: *Jülich 2021*¹⁰

In allen hier ausgewerteten Szenarien **sinkt der Endenergiebedarf**, von 2.317 TWh real im Jahr 2020 auf 1.863 bis 2.245 TWh im Jahr 2030 und im Jahr 2045/2050 auf

4 UBA 2019.

5 BMWi 2021-1.

6 Agora 2021.

7 dena 2021-1.

8 Ariadne 2021-1.

9 BDI 2021.

10 FZJ 2021.

1.056 bis 1.791 TWh.¹¹ Grundsätzlich lässt sich eine Reduktion des Endenergiebedarfs mit den Strategien Effizienz und Suffizienz erreichen, welche in den untersuchten Szenarien unterschiedlich stark Anwendung finden.

Abbildung 2 gibt einen Überblick über Strategien zur Reduktion des Energiebedarfs entlang der Kette von der Energieservice-Nachfrage zur Endenergienachfrage. Suffizienzstrategien zur Reduktion des Endenergieverbrauchs können zunächst an der Reduktion des Bedarfs nach Energieservice-Leistungen ansetzen, zum Beispiel eine Reduktion der Nachfrage nach Mobilität aufgrund eines kürzeren Arbeitsweges. Weiterhin kann auf eine qualitativ verschiedene Technologie (im Sinne von teilweise veränderten Nutzenaspekten¹²) zur Erfüllung der Servicenachfrage verlagert werden, zum Beispiel auf das Fahrrad als eine alternative Art des Verkehrsmittels zum Pkw. Weiterhin kann der Endenergiebedarf durch Effizienzstrategien reduziert werden, welche im Verkehrssektor beispielsweise durch effizientere Antriebe realisiert werden können.

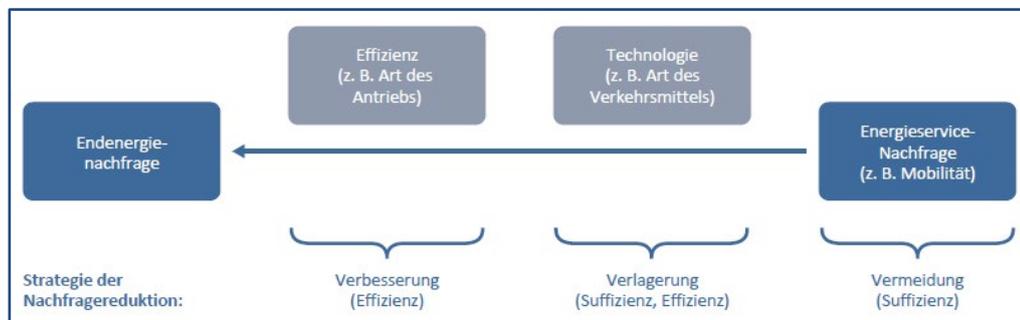


Abbildung 2: Strategien der Endenergieverbrauchsreduktion entlang der Umwandlungskette zum Energieservice und beispielhafte Erläuterung für den Sektor Verkehr. Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Creutzig et al 2018¹³

Diese Reduktion des Endenergiebedarfs geschieht in den betrachteten Szenarien **vor allem aufgrund angenommener Effizienzgewinne**. Nur wenige Studien betrachten Wirkungen von durch politische Rahmenbedingungen ermöglichten Verhaltensänderungen, die der Strategie der „Suffizienz“ zuzuordnen sind – zum Beispiel einen reduzierten Pendlerverkehr durch andere Siedlungsmuster. Der veränderte Endenergiebedarf wird in den Studien anhand prognostizierter Energieservicenachfrage, genutzter Technologien und Effizienz aus Sektormodellen berechnet. Dabei werden politische Maßnahmen für Effizienz- oder insbesondere Suffizienzstrategien nicht explizit modelliert oder quantifiziert; jedoch leiten die meisten Studien Optionen für Politikmaßnahmen aus den Szenarienergebnissen ab. Eine Ausnahme ist der Sektor Verkehr in den BMWi LFS3 (jedoch nicht Gebäude und Industrie), bei denen verschiedene politische Maßnahmen als Input in den Sektormodellen abgebildet sind. Diese lassen sich teilweise als Maßnahmen der Suffizienz- (zum Beispiel Kostensteigerung von 5 Prozent für MIV-Nutzung in der Stadt, Reduktion der Fahrzeiten im Bahnfernverkehr um 10 Prozent) und vor allem Effizienzpolitik (zum Beispiel vergünstigte Besteuerung von Elektrofahrzeugen als Dienstwagen) zuordnen. Im Sektormodell Verkehr sind Verkehrsleistung, Modal Split und Fahrzeugmodell Outputs des Modells.

¹¹ Diese Zahlen drücken die gesamte Bandbreite an Werten aus, in Abbildung 4 werden auch die Quartile und der Median der Verteilung über die verschiedenen Szenarien dargestellt.

¹² Fischer et al. 2013.

¹³ Creutzig et al. 2018.

In den folgenden Unterkapiteln zu den einzelnen Sektoren werden die aktuellen Endenergiebedarfe und ihre Entwicklung in den Szenarienstudien verglichen. Zusätzlich werden in den Studien abgeleitete Handlungsoptionen zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Strategie und dem Zeitraum ihrer potenziellen Wirkung klassifiziert. Dadurch wird sichtbar, ob sich die Maßnahmen eher für das Erreichen kurzfristiger, mittelfristiger oder langfristiger Klimaziele eignen. Eine ausführliche Diskussion der Maßnahmen und Einordnung ihrer Strategie (Vermeidung, Verlagerung, Effizienzsteigerung) sowie ihres Wirkungszeitpunktes findet sich in der zu dieser Stellungnahme zugehörigen Analyse. Es ist zu beachten, dass viele Maßnahmen nicht alternativ zu betrachten sind, sondern vielmehr als Maßnahmenbündel eine Einsparwirkung zeigen. In dieser Stellungnahme erfolgt daher keine qualitative Bewertung einzelner in den Studien genannter Maßnahmen.

2.1.1 Verkehr

Der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors beträgt aktuell (2020) 637 TWh und macht 27 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs aus. Er sinkt in allen Szenariestudien bis 2045/50 auf 187 bis 516 TWh.

Im **Personenverkehr** werden in den Szenarienstudien die Klimaziele des Verkehrssektors mit einem **Mix aus Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs und dessen Verlagerung auf andere Verkehrsmittel** sowie in einigen Szenarien **die Verringerung des nationalen Flugverkehrs** erreicht. Nur in den UBA 2019-Szenarien GreenLife und GreenSupreme sinkt auch der internationale Luftverkehr. Diese Strategien machen in den Szenarien unterschiedlich starke Anteile an der Emissionsreduktion aus. Dies zeigt sich beispielsweise am angenommenen Anteil des motorisierten Individualverkehrs an der Verkehrsleistung in 2045, der mit 58 Prozent bis 82 Prozent eine große Bandbreite aufweist. Das obere Ende von 82 Prozent entspricht seinem Anteil in 2019. Die Verlagerung von Verkehr wird in den Studien in der Regel exogen vorgegeben, sodass Strategien und politische Rahmenbedingungen für deren Umsetzung nicht spezifiziert sind. Eine Ausnahme sind die Langfristszenarien (BMW 2021 LFS3), in denen politische Maßnahmen und Preisentwicklungen Eingangsdaten des Modells sind und die Verkehrsnachfrage und der Modal Split endogen aus einem Verkehrsmodell bestimmt werden. Mögliche Handlungsoptionen, die zur Verlagerung auf andere Verkehrsmittel führen können, werden dennoch in den betrachteten Studien genannt und vermehrt in der Literatur diskutiert: Häufig genannte relevante Hebel sind die Umverteilung des Verkehrsraums zugunsten des Umweltverbundes in Städten, also Fuß- und Radverkehr sowie ÖPNV (Handlungsfeld 9.2), und die Stärkung des öffentlichen Personenverkehrs (ÖPV) als Alternative zum Pkw (Handlungsfeld 9.1). Beide Hebel können unterstützt werden durch den Abbau von finanziellen Vorteilen bis hin zur Einführung finanzieller Nachteile für den motorisierten Individualverkehr. Der technologische Umbau des motorisierten Individualverkehrs wird in Handlungsfeld 15 thematisiert. Die Vermeidung von Wegen spielt nur in wenigen Szenarien eine Rolle – **die meisten Studien gehen zukünftig von einer nahezu gleichbleibenden Gesamtverkehrsleistung aus**. Die UBA 2019 Studie berücksichtigt hingegen die Vermeidung von Wegen zur Reduktion von Verkehrs- und somit Energienachfrage und nennt mögliche Handlungsoptionen, diese Vermeidung zu ermöglichen (Handlungsfeld 9.3).

Im **Güterverkehr** wird in fast allen Szenarien eine **steigende Güterverkehrsleistung** erwartet, von heute 679 auf 853 bis 995 Milliarden Tonnenkilometer in 2045/2050. Dies ist maßgeblich begründet durch die Annahme eines steigenden Wirtschaftswachstums. Eine Ausnahme sind die Szenarien UBA 2019 GreenSupreme und GreenLife: Sie nehmen an, dass durch Konsumvermeidung und Regionalisierung von Wirtschaftskreisläufen ein Rückgang auf 584 bis 619 Milliarden Tonnenkilometer in 2050 erfolgen wird. Im Gegensatz dazu ist die wichtigste Strategie zur Emissionsreduktion im Güterverkehr in allen Studien ein **steigender Anteil der Bahn an der Güterverkehrsleistung, welcher durch politische Rahmenbedingungen gefördert werden könnte** (Handlungsfeld 9.4). Dies führt in einzelnen Szenarien nahezu zu einer Verdopplung der Schienen-Güterverkehrsleistung. In vielen Szenarien wird außerdem die Nutzung von elektrisch betriebenen Lkw angenommen; einige wenige betrachten dabei auch Oberleitungs-Lkw.

Die in den untersuchten Szenarienstudien vorgeschlagenen Handlungsoptionen im Personen- und Güterverkehr reduzieren größtenteils erst mittel- oder langfristig den Endenergieverbrauch. Zusätzlich werden in neueren Veröffentlichungen – als Reaktion auf die Energiekrise 2022 – vermehrt kurzfristige Handlungsoptionen mit sofortiger Wirkung diskutiert (zum Beispiel ein Tempolimit auf Autobahnen); diese können auch mittel- und langfristig Emissionen reduzieren, wenn sie beibehalten werden. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Handlungsoptionen, die in den Szenarienstudien der Metaanalyse und in den neueren Veröffentlichungen genannt werden, und zeigt den Zeitraum der potenziellen Einsparwirkung für die Handlungsoptionen.

Sektor	Kurzfristige Wirkung (innerhalb 1–3 Jahre)	Mittelfristige Wirkung (Klimaziele 2030)	Langfristige Wirkung (Klimaziele 2045)
Verkehr (Personen)		Kurze Wege durch verteiltes Versorgungsangebot (Stadt, Land)	
		Ermöglichung von „digitaler Mobilität“ (Homeoffice, digitale Dienstreisen, digitale Ämter)	
	Kurzfristige Kapazitätserweiterung des ÖPNV	Aufbau eines zeitlich und räumlich verfügbaren ÖPNV, inklusive Sharing- und On-Demand-Konzepten	
		Anreize zu vermehrter Nutzung des ÖPNV-Angebots, zum Beispiel preisgünstige Tickets und einfache Buchung	
	Pop-up Rad- und Fußwege	Verkehrsraum umverteilen zugunsten Rad- und Fußverkehr	
	Temporäre Fernbusverbindungen	(Inter-)nationales Zugangebot im Fernverkehr ausbauen	
		Finanzielle Anreize für Umstieg weg vom Pkw, Abbau von Pkw-Subventionen	
		Incentivierung von erhöhter Fahrzeugauslastung, zum Beispiel Förderung von Ridesharing und reduzierter Fahrzeuggröße	
		Effizienzsteigerung der Antriebe (konventionell und elektrisch)	
		Incentivierung von Umstieg auf E-Pkw, unter anderem Ladeinfrastruktur ausbauen	
Verkehr (Güter)		Tempolimit	
		Vermeidung, zum Beispiel durch politisch bewirkte Nachfragereduktion und Regionalisierung	
		Incentivierung von Verlagerung auf (Hybrid-) Oberleitungs-Lkw, Bahn und Schiff (unter anderem Infrastrukturaufbau, finanzielle Anreize)	
		Effizienzsteigerung Flugzeuge, Schiffe, Lkw	
	Anteil E-Lkw erhöhen, zum Beispiel durch emissionsabhängige Lkw-Maut		

Tabelle 6: Metaanalyse – Optionen zur Energieverbrauchsreduktion, klassifiziert nach Zeitpunkt ihrer potenziellen Wirkung sowie nach Vermeidung (blau), Verlagerung (orange), und Effizienzsteigerung (grün) im Verkehr. Quelle: eigene Darstellung; Handlungsoptionen aus Szenarienstudien¹⁴ sowie aus den als Reaktion auf die Energiekrise 2022 veröffentlichten Studien zu kurzfristigen Handlungsoptionen¹⁵

2.1.2 Gebäude

Der Endenergieverbrauch des Gebäudesektors betrug im Jahr 2020 etwa 1.023 TWh (44 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs) und sinkt in verschiedenen Szenarien der Systemtransformation bis 2045/2050 auf 494 bis 748 TWh. Den größten Anteil am Energieverbrauch im Gebäudesektor macht die **Wärmebereitstellung** aus. Diese wird vor allem durch die gesamte zu beheizende Gebäudefläche (vor allem Wohnfläche) sowie die Effizienz der Gebäudehüllen und der Heizungsanlagen bestimmt. Eine Reduktion der Wohnfläche pro Kopf, die im Jahr 2021 47,7 Quadratmeter beträgt, wird nur in den Szenarien UBA 2019 GreenLife und GreenSupreme diskutiert. Dort wird angenommen, dass sie bis 2050 auf 41,2 Quadratmeter pro Person sinkt. In allen anderen Szenarien wird ein Anstieg auf 49,4 bis 57,4 Quadratmeter pro Person in 2045 angenommen – und somit eine Fortsetzung des aktuellen Trends zu größeren Wohnflächen. Die meisten Studien fokussieren auf die **Sanierung** zur Steigerung der Effizienz der Gebäudehüllen. In nahezu allen Studien wird ein Energieträgerwechsel für die

14 Ariadne 2021-1, Agora 2021, BDI 2021, dena 2021-1, BMWI 2021-1, UBA 2019.

15 Greenpeace 2022, Öko-Institut 2022, UBA 2022, Agora 2022, DIW 2022, FZJ 2022

Beheizung betrachtet und eine deutlich gesteigerte Sanierungsrate und -tiefe des Bestands angesetzt: von 1,1 Prozent in 2019 auf 1,6 Prozent bis 3,9 Prozent in 2045 beziehungsweise von einem jährlichen Raumwärmebedarf von 100 kWh/m² in 2019 auf 61 bis 40 kWh/m² bis 2045.

Würde der Trend zu steigender Pro-Kopf-**Wohnfläche** abreißen, würde diese nicht nur den Energieverbrauch reduzieren, sondern auch den Bedarf an Neubauten. Dies könnte mittel- bis langfristig durch eine flexiblere Nutzung des Bestandes, die Umnutzung von Gebäuden und die Vermeidung von Leerstand erreicht werden. Weitere eher kurz- bis mittelfristige Maßnahmen sind eine **Absenkung der Raumtemperatur** in beheizten Gebäuden sowie eine allgemein steigende **Effizienz von technischen Geräten, Heizungsanlagen oder Klimatisierung** (Handlungsoption 10.1). Bei der Sanierung von Bestandsgebäuden und im Neubau steht zwar die Reduktion des Heizenergiebedarfs im Vordergrund, sie kann aber auch durch Maßnahmen zum Hitzeschutz den zukünftigen Energiebedarf für die Kühlung reduzieren (Handlungsoption 10.2). Dies wird mit Fortschreiten des Klimawandels an Bedeutung gewinnen. Tabelle 7 zeigt die Handlungsoptionen aus den Szenarienstudien und ihren Wirkungszeitraum im Überblick. Abbildung 6 zeigt zudem die Bandbreite von zusätzlich zu installierenden Wärmepumpen bis 2050 gemäß eigenen Modellrechnungen.

Sektor	Kurzfristige Wirkung (innerhalb 1-3 Jahre)	Mittelfristige Wirkung (Klimaziele 2030)	Langfristige Wirkung (Klimaziele 2045)	
Gebäude		Politisch geförderte Umnutzung, Teilung, gemeinschaftliche Nutzung und Tausch von Bestandsgebäuden		
	Absenkung der Heiztemperatur in (Nicht-)Wohngebäuden ermöglichen oder vorschreiben, insbesondere öffentliche Gebäude			
	Informationskampagnen zu effizientem Lüften, Heizen und Duschen			
		Klimaanpassung bei der Stadt- und Gebäudeplanung		
	Informationskampagnen zu schnell umsetzbaren Dämmungsmaßnahmen	Politisch getriebene Sanierung von Bestandsgebäuden		
	Betriebsoptimierung bestehender Heizungsanlagen	Effizienzsteigerung (neuer) technischer Geräte, Heizungsanlagen, Klimaanlagen		
		Rahmenbedingungen für den Umstieg auf ressourcenschonende Baustoffe (beispielsweise Recyclingbaustoffe, nachwachsende Rohstoffe)		

Tabelle 7: Metaanalyse – Optionen zur Energieverbrauchsreduktion, klassifiziert nach Zeitpunkt ihrer potenziellen Wirkung sowie nach Vermeidung (blau), Verlagerung (orange) und Effizienzsteigerung (grün) im Gebäudebereich. Quelle: eigene Darstellung; Handlungsoptionen aus Szenarienstudien (Ariadne 2021-1, Agora 2021, BDI 2021, dena 2021-1, BMWI 2021-1, Jülich 2021, UBA 2019) sowie aus den als Reaktion auf die Energiekrise 2022 veröffentlichten Studien zu kurzfristigen Handlungsoptionen (Greenpeace 2022, Öko-Institut 2022, UBA 2022, Agora 2022, DIW 2022, FZJ 2022).

2.1.3 Industrie und Konsum

Der Endenergieverbrauch des Industriesektors lag im Jahr 2020 bei 657 TWh und machte somit 28 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs aus. In den Szenarienstudien ergibt sich kein einheitliches Bild hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung. Es werden Endenergiebedarfe zwischen 554 und 739 TWh in 2030 sowie zwischen 375 und 963 TWh im Jahr 2045/50 angenommen. Zur Reduktion des Endenergiebedarfs und der Emissionen der Industrie werden in allen Szenarien starke Effizienzfortschritte durch Technologieverbesserungen und Elektrifizierung sowie verstärktes Recycling

von Materialien angenommen. Die Änderung der Produktionsmengen durch die Nutzung alternativer Materialien und eine Reduktion des Konsums fällt in den Szenarien sehr unterschiedlich aus. Diese starken Bandbreiten werden am Beispiel der Stahlproduktion deutlich: Hier sinkt der spezifische Endenergiebedarf pro produzierte Einheit in 2045/2050 gegenüber 2015 um 27 bis 50 Prozent. Bei der Produktionsmenge wird in einigen Szenarien von einem starken Rückgang von 7 Prozent (Fokus effizienterer Materialnutzung in Produkten) bis -11 Prozent (Fokus Konsumrückgang) beziehungsweise von -21 Prozent (Kombination aus Konsumreduktion und Materialeffizienz) ausgegangen. In anderen Szenarien wird von einer nahezu gleichbleibenden Produktionsmenge (-3 bis +5 Prozent), und an anderer Stelle von einer deutlichen Steigerung um 10 Prozent im Jahr 2045/2050 gegenüber 2015 ausgegangen. Die in den Szenariestudien vorgeschlagenen Effizienz- und Suffizienzstrategien zur Reduktion des Endenergiebedarfs im Industriesektor werden in Tabelle 8 im Überblick gezeigt.

Die Vermeidung von Produktion kann durch politische Incentivierung von **effizienter und intensiverer Nutzung (zum Beispiel durch Sharing-Konzepte) und längerer Nutzungsdauer und Reparaturmöglichkeit** (Handlungsfeld 11.2) erreicht werden. Zusätzlich besteht für Materialien, für die es keine klimafreundliche Herstellungsweise gibt, die Option, **alternative Materialien durch politische Rahmenbedingungen besserzustellen. Dies wird durch CO₂-Bepreisung unterstützt**. Kriterien für diese Materialien sind, dass sie weniger energie- und ressourcenintensiv oder besser kreislauffähig oder nachwachsend sind (Handlungsfeld 11.1). Der technologische Umbau im Industriesektor wird in Kapitel 6 beschrieben.

Sektor	Kurzfristige Wirkung (innerhalb 1–3 Jahre)	Mittelfristige Wirkung (Klimaziele 2030)	Langfristige Wirkung (Klimaziele 2045)
Industrie und Konsum	Incentivierung längerer Nutzung und Reparatur von Produkten innerhalb des bestehenden Angebots	Rahmenbedingungen schaffen für Entwicklung und weit verbreitete Nutzung langlebiger, reparierbarer und kreislauffähiger Produkte	
	Incentivierung gemeinschaftlicher Nutzung und Wiederverwendung von Produkten innerhalb des bestehenden Angebots	Aufbau von Strukturen für flächendeckende Sharing-Konzepte und die Wiederverwendung von Produkten	
		Politisch geförderter Wechsel zu material- und ressourcensparenden Produkten und weniger energieintensiven, nachwachsenden Materialien	
	Politische Förderung schnell umsetzbarer Prozesselektifizierung, zum Beispiel Niedertemperaturprozesse, mechanische Energie	Rahmenbedingungen für weitreichende Prozesselektifizierung	
	Schnell umsetzbare Effizienzmaßnahmen	Effizientere Technologien und Prozessoptimierung	
		Rahmenbedingungen für vermehrtes Recycling	

Tabelle 8: Metaanalyse – Optionen zur Energieverbrauchsreduktion, klassifiziert nach Zeitpunkt ihrer potenziellen Wirkung sowie nach Vermeidung (blau), Verlagerung (orange), und Effizienzsteigerung (grün) im Bereich Industrie und Konsum. Quelle: eigene Darstellung; Handlungsoptionen aus Szenariestudien (Ariadne 2021-1, Agora 2021, BDI 2021, dena 2021-1, BMWI 2021-1, UBA 2019) sowie aus den als Reaktion auf die Energiekrise 2022 veröffentlichten Studien zu kurzfristigen Handlungsoptionen (Greenpeace 2022, Öko-Institut 2022, UBA 2022, Agora 2022, DIW 2022, FZJ 2022).

2.2 Szenarien für eine klimaneutrale Energieversorgung

Im Rahmen dieser Analyse wurden eigene Szenarien berechnet und mit bestehenden Szenarien verglichen. Die Box „Metaanalyse: Studienübersicht“ gibt eine Übersicht über die ausgewerteten Studien. Ein Überblick über die im Rahmen der Arbeitsgruppe erstellten eigenen Szenarien und deren zentrale Ergebnisse findet sich in Abschnitt 2.3. Der Fokus der Untersuchung liegt dabei auf der Bedeutung einer Nachfragereduktion und eines beschleunigten Technologiehochlaufs für die Erreichung der Klimaziele sowie auf der Frage, unter welchen Annahmen eine klimaneutrale Energieversorgung bereits vor 2045 möglich ist. Für eine detaillierte Darstellung der Annahmen und Ergebnisse der Szenarien sei auf die dieser Stellungnahme zugrunde liegenden Analyse verwiesen.¹⁶ Da die vorliegende Stellungnahme sich auf Deutschland bezieht, wurden ausschließlich Szenarien mit Deutschland als Hauptuntersuchungsland betrachtet. Die analysierten Studien bilden in der Modellierung aber auch das europäische Ausland ab und beinhalten die Möglichkeit zu Importen aus nicht europäischen Ländern. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Studien teilweise einen unterschiedlichen Bilanzraum haben. Beispiel hierfür ist die in einzelnen Studien fehlende Bilanzierung der Umweltwärme im Gebäudesektor oder des internationalen Flug- und Schiffverkehrs im Verkehrssektor.

Da die ursprünglichen Szenarienrechnungen bereits im Jahr 2021 erfolgten, wurden in einer zusätzlichen Sensitivitätsanalyse die Auswirkungen von höheren Erdgaspreisen auf die zuvor dargestellten Ergebnisse analysiert. Die Schlussfolgerungen dieser Sensitivitätsanalyse sind in der Box „Einordnung der Ergebnisse in Bezug auf langfristig erhöhte Erdgaspreise“ auf Seite 41 zusammengefasst.

Alle Szenarien zeigen, dass im Energiesektor bis 2045 eine **erhebliche Beschleunigung des Ausbaus verschiedener Technologien** notwendig ist, um Klimaneutralität zu erreichen. Selbst bei einem starken Nachfragerückgang, unter anderem basierend auf umfassenden Suffizienzmaßnahmen, muss der Technologieausbau im Vergleich zum bisherigen Zubau stark beschleunigt werden. Zur Veranschaulichung der notwendigen Ausbaugeschwindigkeiten zeigt Abbildung 3 die notwendige installierte Leistung für Photovoltaik (PV) und Windkraft in 2030 und 2045/50. Trotz bestehender Unterschiede zwischen den Szenarien ergeben sich hier einheitlich sehr hohe Ausbauraten für diese Technologien. Viele der Szenarien (mit Ausnahme der Ariadne-Szenarien) liegen beim PV-Ausbau dennoch unter den von der Bundesregierung für 2030 anvisierten Zielen. Bei Wind an Land liegen die offiziellen Zielpfade innerhalb der durch die Szenarienstudien aufgespannte Bandbreite, bei Wind auf See knapp über dem Mittelwert der Szenarien. Die politischen Ziele erscheinen daher an den Bedarfen gemessen recht passend, sind dennoch ambitioniert und müssen durch einen entsprechenden gesetzlichen Rahmen ermöglicht werden.

Alle Studien betonen die Relevanz von Flexibilisierung im Stromsystem, um die hohen Anteile fluktuierender erneuerbarer Energien zu integrieren. Neben einer stärkeren europäischen Vernetzung im Stromhandel und dem Aufbau von Speicherkapazitäten muss eine Lastflexibilisierung in allen Verbrauchssektoren erfolgen. Ein wesentlich höheres Potenzial zur Flexibilisierung als konventionelle Stromverbräuche haben die Sektorkopplungstechnologien. Der netzdienliche Betrieb von Elektrolyseuren¹⁷ und

¹⁶ Ragwitz/Weidlich 2023.

¹⁷ Neben der Flexibilisierung der Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse spielt in vielen Studien die Rückverstromung von Wasserstoff ebenfalls eine wichtige Rolle zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit im Stromsystem.

Wärmepumpen sowie das gesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen können einen großen Beitrag zur Stabilisierung des Stromsystems leisten.

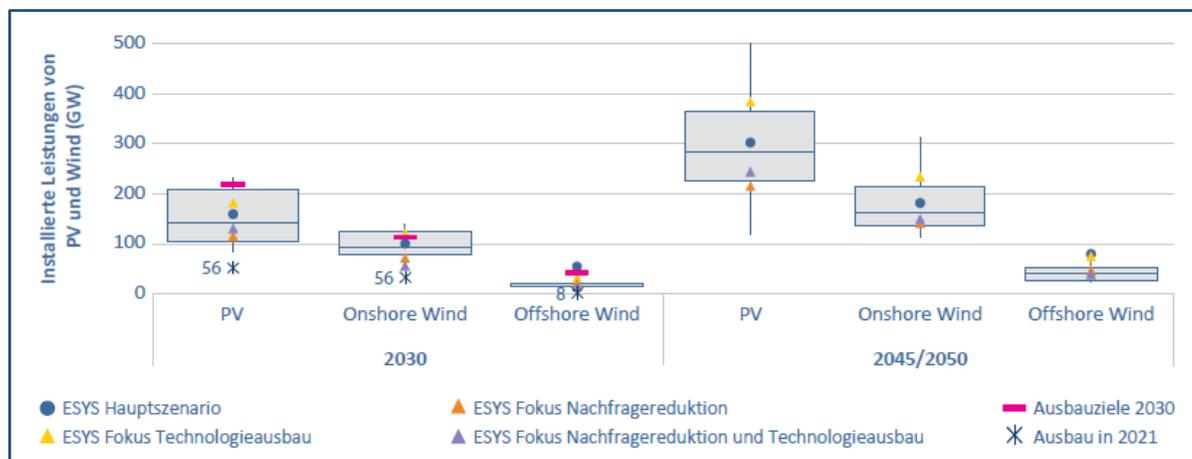


Abbildung 3: Entwicklung der installierten Leistungen von Photovoltaik, Onshore Wind und Offshore Wind in den untersuchten Szenarien. Zieljahr 2050 bei UBA 2019 und BMWI 2021-1, Zieljahr 2045 bei allen anderen Szenarien. Ariadne Szenarien: beziehen sich auf das Hybridmodell. Quelle: Studienauswertung ESYS.

Neben der Notwendigkeit der schnellen Technologiediffusion lässt sich aus den Szenarienstudien sowie aus Abbildung 4 schließen, dass **über alle Sektoren eine Energienachfragereduktion** mit unterschiedlichem Umfang angestrebt wird. Insgesamt ergibt sich in den betrachteten Studien ein Rückgang des gesamten Endenergiebedarfs im Zieljahr 2045/2050 von 18 Prozent bis 54 Prozent gegenüber heute¹⁸. Energieeffizienz kommt hierbei in allen Szenarien eine bedeutsame Rolle zu. In einigen Szenarien (zum Beispiel *UBA GreenSupreme*) werden darüber hinaus starke Suffizienzmaßnahmen angenommen. Der gesamte Endenergiebedarf im *Hauptszenario ESYS KN2045* liegt im Jahr 2045 im Vergleich zu den betrachteten Studien am oberen Rand des Wertebereichs, während sich die Szenarien *Fokus Nachfragereduktion* und *Fokus Nachfragereduktion und Technologieausbau* hingegen am unteren Rand einordnen. Zusätzlich impliziert die Abbildung 4, dass **direktelektrische Optionen in vielen Fällen zu bevorzugen** sind, in denen solche Optionen technisch möglich und wirtschaftlich darstellbar sind, da diese oft eine deutlich höhere Effizienz aufweisen und in der Regel geringere Kosten verursachen als alternative Technologien. Eine Steigerung der Direktelektrifizierung ist studienübergreifend zu beobachten. Der Anteil von Strom am gesamten Endenergiebedarf beträgt hierbei 21 bis 31 Prozent im Jahr 2030 und 32 bis 63 Prozent im Zieljahr 2045/2050. Synthetische Energieträger sind in vielen Industrieprozessen notwendig, beispielsweise als Reduktionsmittel in der Stahlherstellung, sowie als Kraftstoff für den internationalen Schiffs- und Flugverkehr. In diesen Bereichen werden erneuerbare stoffliche Energieträger (Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe und Bioenergie) eingesetzt, um die fossilen Brenn- und Kraftstoffe zu ersetzen. Der Anteil von erneuerbaren stofflichen Energieträgern steigt ebenfalls von 2 bis 14 Prozent im Jahr 2030 auf 15 bis 51 Prozent im Zieljahr 2045/2050. Andere Energieträger, wie Fern- und Umgebungswärme, spielen in den Endenergiesektoren eine kleinere, aber ebenfalls wichtige Rolle für die Erreichung der Klimaneutralität.

18 Laut AGEB liegt der Endenergiebedarf im Jahr 2020 bei 2317 TWh.

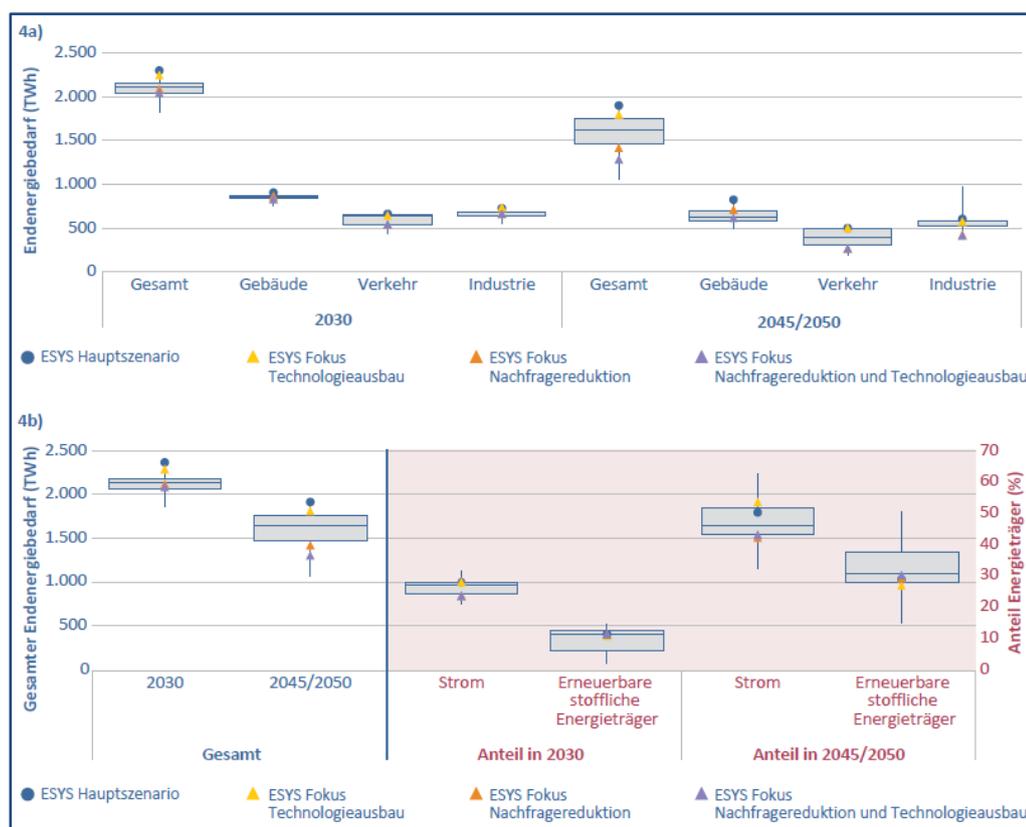


Abbildung 4: Gesamter Endenergiebedarf (in TWh, links) nach Sektoren (oben) und nach Anteilen der Energieträger (unten, in Prozent, mittig und rechts) in den untersuchten Szenarien für 2030 und 2045/2050. Daten für 2050 bei UBA 2019 und BMWi LFS3 2021, 2045 bei allen anderen Szenarien. Szenarien aus *Ariadne 2021* beziehen sich auf das Hybridmodell; Quelle: Studienauswertung ESYS.

Im Folgenden werden weitere Schlussfolgerungen für die Sektoren Gebäude, Verkehr und Industrie sowie für den Markthochlauf von Wasserstoff erläutert. Eine detailliertere Darstellung für die Ergebnisse der Industrie findet sich in Abschnitt 2.4.

2.1.4 Klimaneutralität im Gebäudesektor

Im Gebäudesektor sind für das Erreichen der Klimaneutralität in allen Szenarien der Metaanalyse und den eigenen Szenarien drei Entwicklungen ausschlaggebend: Die **Sanierungsraten** für Gebäude sind deutlich höher als bisher, die **Fernwärmenetze** werden aus- und umgebaut und bei den individuellen Heizungen liegt der Fokus sehr deutlich auf **Wärmepumpen**.

Abbildung 5 zeigt den Endenergieverbrauch im Gebäudesektor (Haushalt, Gewerbe, Handel und Dienstleistung) aus der Metaanalyse und den eigenen Szenarien. Bereits im Jahr 2030 wird neben Haushaltstrom auch ein hoher Anteil der Wärme strombasiert bereitgestellt. In 2045/50 ist Strom als Endenergieträger, welcher in Verbindung mit Umweltwärme für Wärmepumpen genutzt wird, für die Wärmeerzeugung schließlich dominant. Dies gilt auch für die Wärme aus Wärmenetzen.¹⁹ In unterschiedlichem, aber begrenztem Umfang kommen außerdem Biomasse, Wasserstoff und SynFuels zur Wärmebereitstellung zum Einsatz. Besonders hohe Anteile an stofflichen Energieträgern werden in den beiden BMWi-Langfristszenarien „Wasserstoff“

¹⁹ Hier besteht noch eine Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Rolle von Geothermie, die in Gebieten mit gutem Potential vermutlich zu bevorzugen ist.

(BMWi LFS3 H2) und „synthetische Kohlenwasserstoffe“ (BMWi LFS3 PtG/PtL) erreicht. Diese Szenarien untersuchen allerdings auch gezielt die bevorzugte Nutzung von Wasserstoff beziehungsweise SynFuels, obwohl dies höhere Gesamtsystemkosten verursachen würde als die direkte Stromnutzung, die als bevorzugte Option im Langfrist-szenario „Strom“ (BMWi LFS3 Strom) untersucht wird. Der Endenergiebedarf der E-SYS-Szenarien liegt am oberen Rand der ausgewerteten Szenarien. Dies kann auf konservative Annahmen zur Entwicklung der Wohnfläche und auf ambitionierte, aber im Vergleich zu anderen Studien geringere Sanierungsraten zurückgeführt werden. Während in vielen Studien Pfade für die Sanierung fest vorgegeben werden, ist dies im RE-Mod-Modell eine Variable in der sektorübergreifenden Optimierung. Da Sanierungen sehr teuer sind, werden sie vom Modell oft als letzte verfügbare Option gewählt und stattdessen werden ein zusätzlicher Ausbau der erneuerbaren Energien oder Maßnahmen in anderen Sektoren bevorzugt. Die Optimierung erfolgt hierbei jedoch rein nach Kostengesichtspunkten unter Einhaltung eines Emissionsbudgets. Wie auch bei der Mehrzahl der ausgewerteten Studien (mit Ausnahme von UBA 2019) bleiben dabei andere Aspekte wie der Flächenverbrauch, der Rohstoffverbrauch und die Auswirkungen auf das Ökosystem unberücksichtigt. In realen Pfadentscheidungen zwischen einer stärkeren Gebäudesanierung und einem zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien sollten diese Aspekte jedoch berücksichtigt werden.

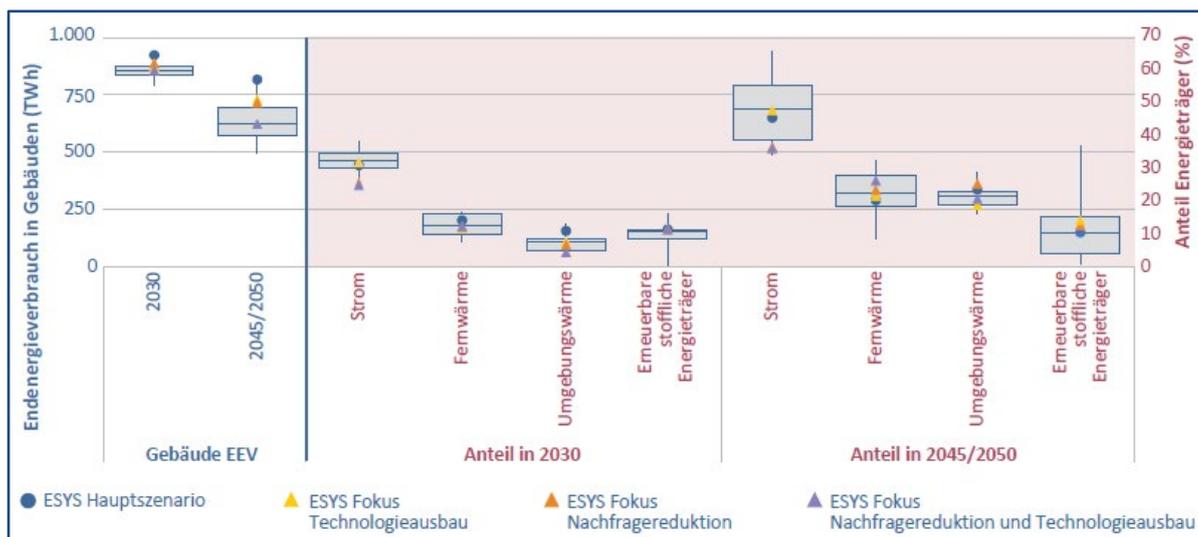


Abbildung 5: Gesamter Energiebedarf von Gebäuden (Haushalt, Gewerbe, Handel und Dienstleistung) (in TWh, links) und die Anteile der wichtigsten Energieträger (in Prozent, mittig und rechts) in den untersuchten Szenarien für 2030 und 2045/2050. Daten für 2050 bei UBA- und BMWi-Szenarien, 2045 bei allen anderen Szenarien. Jülich- und dena-Szenarien weisen keine Umgebungswärme aus. Ariadne-Szenarien: beziehen sich auf das Hybridmodell; Umweltwärme und Solarthermie sind in „Fernwärme“ beinhaltet. Quelle: Studienauswertung ESYS.

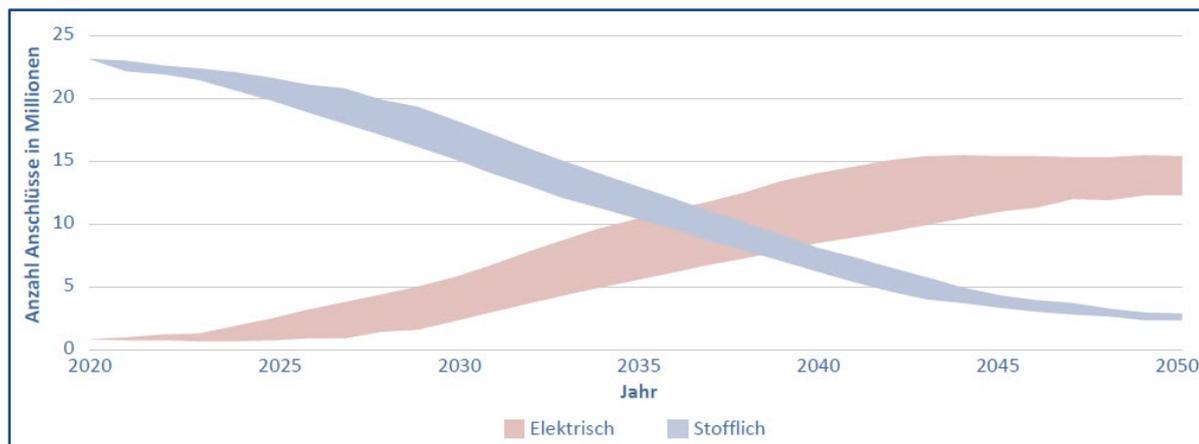


Abbildung 6: Korridore aus den vier ESYs-Szenarien für die Anzahl elektrisch betriebener und mit stofflichen Energieträgern betriebener Heizungsanschlüsse²⁰ in Millionen in den Jahren 2020 bis 2050

2.1.5 Klimaneutralität im Verkehrssektor

Im Verkehrssektor kommen zum Erreichen der Klimaneutralität unterschiedliche Technologien zum Einsatz. Alle Szenarienstudien kommen jedoch zu dem Ergebnis, dass **für den motorisierten Individualverkehr die Elektromobilität die kostengünstigste und effizienteste Lösung darstellt**. Für die internationale Luft- und Schifffahrt kommen in allen Szenarien, außer dem Szenario *Jülich TS2045*, welches diese nicht mitbilanziert, wasserstoff- oder biomassebasierte Flüssigkraftstoffe zum Einsatz, da nur so die notwendigen Energiedichten erreicht werden können. Beim Schwerlastverkehr unterscheiden sich dagegen die Szenarien: Während durchgehend eine stärkere Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene angenommen wird, kommen beim Straßenverkehr in unterschiedlichem Ausmaß batterieelektrische, Oberleitungs- und Wasserstofffahrzeuge zum Einsatz.

Abbildung 7 zeigt die Zusammensetzung der Endenergienachfrage im Verkehrssektor in den unterschiedlichen Szenarien. Die deutlichen Unterschiede in der Zusammensetzung der Endenergienachfrage sind teilweise durch Schwerpunkte der Szenarien begründet (zum Beispiel spezieller Fokus auf Wasserstoff beziehungsweise SynFuels) sowie aus unterschiedlichen Annahmen zur Nachfrage nach Verkehrsdienstleistungen. Innerhalb der ESYs-Szenarien zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Szenarien mit und ohne Fokus auf Nachfragereduktion. Während im Hauptszenario konservativ von steigenden Straßenverkehrsleistungen ausgegangen wird, ändert sich das Mobilitätsverhalten in Szenarien mit Fokus Nachfragereduktion deutlich (zum Beispiel durch Umstieg auf Fahrrad oder Bahn, Homeoffice etc.). Damit liegen die ESYs-Szenarien bezüglich des Endenergiebedarfs am jeweils oberen beziehungsweise unteren Rand der analysierten Studien. Der Hochlauf batterieelektrischer Pkw erfolgt in den ESYs-Szenarien zügig und umfassend (siehe Abbildung 8). Die vergleichsweise hohen Anteile stofflicher Energieträger im Jahr 2045 resultieren unter anderem in den niedrigen Wirkungsgraden von Verbrennungsmotoren, welche in den ESYs-Szenarien im Lkw-Bereich mit synthetischen Kraftstoffen weiterhin eingesetzt werden. Dabei sind die Pfadentscheidungen im Lkw-Bereich sehr sensitiv gegenüber Kostenannahmen für Energieträger und Technologien. Zukünftige Importpreise für synthetische Kraftstoffe sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Ebenso unsicher sind die Technologiekosten für batterieelektrische Lkw sowie

²⁰ Fernwärmeanschlüsse sind in der Abbildung nicht dargestellt.

Oberleitungs- und Brennstoffzellen-Lkw. Daher können für den Lkw-Verkehr aus der gesamten Studienlage zum jetzigen Zeitpunkt noch keine robusten Pfade abgeleitet werden.

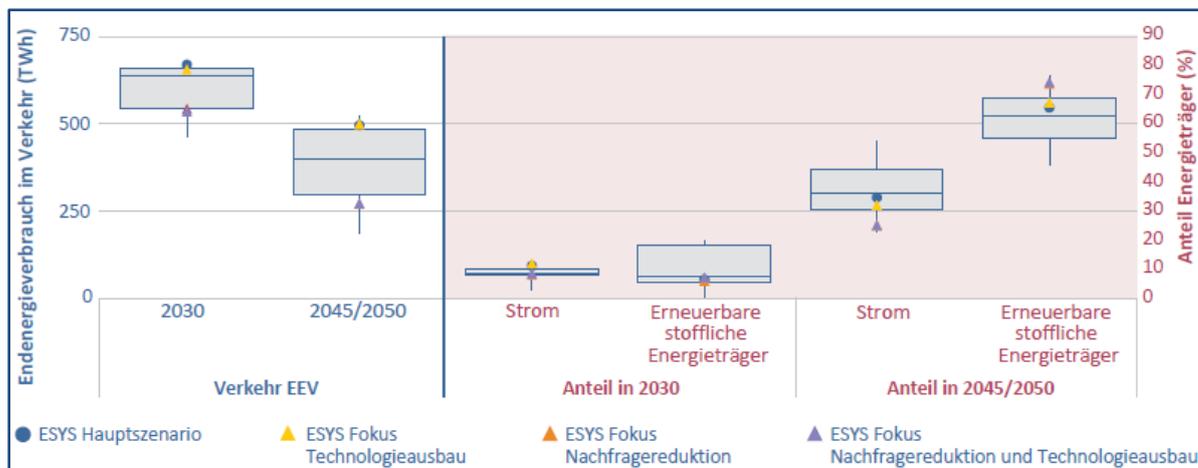


Abbildung 7: Gesamter Energiebedarf im Verkehr (inkl. internationale Luft- und Schifffahrt) (in TWh, links) und die Anteile der wichtigsten Energieträger (in Prozent, mittig und rechts) in den untersuchten Szenarien für 2030 und 2045/2050. Daten für 2050 bei UBA 2019 und BMWi LFS 2021, 2045 bei allen anderen Szenarien; das Szenario *Jülich TS2045* aus *Jülich 2021* bilanziert internationale Luft- und Schifffahrt nicht. Szenarien aus *Ariadne 2021* beziehen sich auf das Hybridmodell. Quelle: Studienauswertung ESYS.

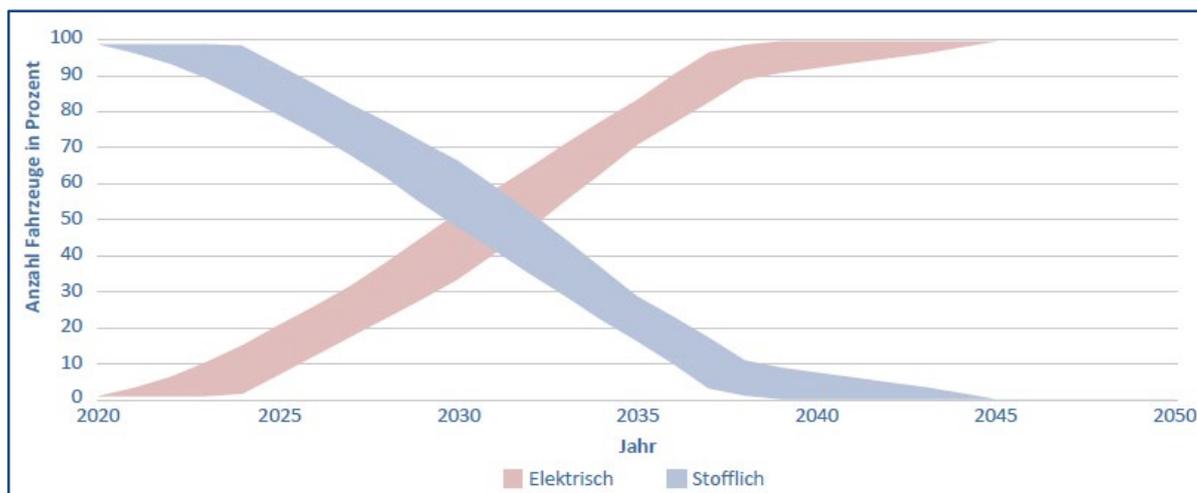


Abbildung 8: Korridore aus den vier ESYS-Szenarien für die prozentualen Anteile batterieelektrischer und mit stofflichen Energieträgern betriebener Pkw in den Jahren 2020 bis 2050

2.1.6 Klimaneutralität im Industriesektor

Im Industriesektor stellt die **Umstellung auf klimaneutrale Prozesse und Rohstoffe** eine der größten Herausforderungen der Dekarbonisierung dar. Neben einer verstärkten Direktelektrifizierung, soweit diese technisch möglich und wirtschaftlich ist, werden hierfür auch erneuerbare stoffliche Energieträger, zum Beispiel als Reduktionsmittel oder für die Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme, eingesetzt. Wasserstoff spielt in der Stahlherstellung und als Rohstoff in der chemischen Industrie in allen betrachteten Szenarien eine entscheidende Rolle.

Wie Abbildung 5 zeigt, geht der Energiebedarf der Industrie in den meisten Szenarien²¹ zwischen 2030 und 2045 zurück. Eine Ausnahme stellt das Szenario *Jülich*

²¹ Eine detaillierte Beschreibung der Szenarien findet sich in Ragwitz/Weidlich 2023.

TS2045 dar, in welchem aufgrund eines Anstiegs der Bruttowertschöpfung und der Güterproduktion in der Industrie ein zunehmender Energiebedarf erwartet wird. Die Industrienachfrage im *Hauptszenario ESYS KN2045* liegt dabei sowohl im Jahr 2030 als auch im Zieljahr 2045/2050 am oberen Rand des Wertebereichs. In den Szenarien Fokus Nachfragereduktion und Fokus Nachfragereduktion und Technologieausbau befindet sich der Energiebedarf im Jahr 2030 ebenfalls zunächst im oberen Bereich, geht anschließend allerdings stark zurück und ordnet sich bis zum Zieljahr 2045/2050 am unteren Rand des Wertebereichs ein.

Durch den vollständigen Verzicht auf fossile Energieträger bis zum Zieljahr 2045/50, steigt der Bedarf an Strom und erneuerbaren stofflichen Energieträgern kontinuierlich an. Je nach Szenario entfallen im Jahr 2030 27 bis 44 Prozent des Endenergiebedarfs auf Strom sowie 1 bis 14 Prozent auf erneuerbare stoffliche Energieträger (davon überwiegend Bioenergie). Im Zieljahr 2045/50 entfallen 35 bis 75 Prozent auf Strom sowie 8 bis 55 Prozent auf stoffliche Energieträger. Alle ESYS-Szenarien zeichnen sich durch einen hohen Strombedarf aus, unter anderem da im Bereich der Hochtemperaturprozesswärme verstärkt Elektrodenkessel eingesetzt werden. Eine vertiefte Analyse zu Industrieprozessen ist in Abschnitt 2.4 dargestellt.

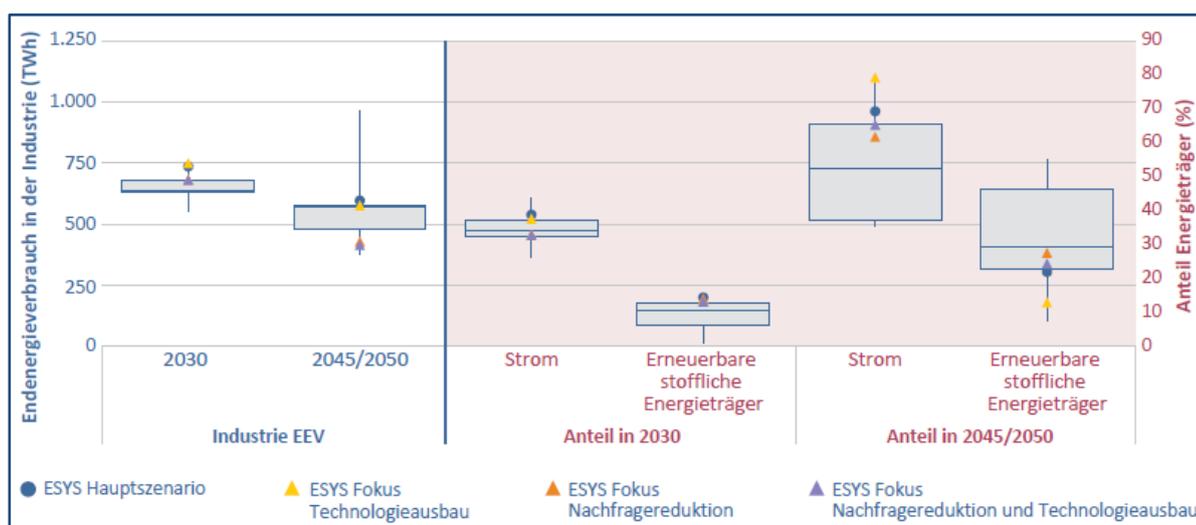


Abbildung 9: Energiebedarf in der Industrie (in TWh, links) und die Anteile der wichtigsten Energieträger (in Prozent, mittig und rechts) in den untersuchten Szenarien für 2030 und 2045/2050. Daten für 2050 bei UBA 2019 und BMWi LFS3 2021, 2045 bei allen anderen Szenarien; Szenarien aus *Ariadne 2021* beziehen sich auf das Hybridmodell. Quelle: Studienauswertung ESYS.

2.1.7 Markthochlauf von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten

Alle Szenarien zeigen, dass Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte SynFuels für das Erreichen der Klimaneutralität eine entscheidende Rolle spielen. Wie Wasserstoff hergestellt wird, hat Auswirkungen auf die mit ihm verbundenen Erfordernisse, Folgen und Risiken: *Blauer Wasserstoff*²² entsteht durch Reformierung aus Erdgas und die Abscheidung von Kohlenstoff. Das so abgeschiedene CO₂ muss langfristig gespeichert werden, und es entstehen durch Methan-Leckagen Restemissionen entlang der Lieferkette von Erdgas sowie Energiebedarfe für die CO₂-Abscheidung. *Grüner Wasserstoff*

²² Blauer Wasserstoff wird in einigen Studien als Brückentechnologie für die Transformation zu wasserstoffbasierten Prozessen gesehen, bis grüner Wasserstoff in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Dieser Pfad ist jedoch im Zuge der Erdgasverknappung und der zu erwartenden dauerhaft erhöhten Erdgaspreise mit zunehmender Unsicherheit verknüpft.

wird per Elektrolyse hergestellt und benötigt zusätzliche Kapazitäten der erneuerbaren Stromerzeugung – mit entsprechendem zusätzlichem Materialverbrauch und Landbedarf (in Deutschland oder, wenn der Wasserstoff importiert wird, im Ausland). Eine direkte Elektrifizierung sollte daher wo immer möglich bevorzugt werden.

Tabelle 9 stellt dar, in welchen Bereichen zukünftig Wasserstoff beziehungsweise andere chemische Energieträger inklusive Biomasse zum Einsatz kommen könnten, in welchen Bereichen direktelektrische Lösungen möglich und vorteilhaft sind, und wo diese Einordnung noch nicht eindeutig klar ist. In der Tendenz der letzten Jahre hat sich dabei gezeigt, dass durch den Fortschritt in Forschung und Entwicklung die Zahl der gezeigten Bereiche, in denen eine Direktelektrifizierung sinnvoll erscheint, zunimmt.

	Industrie	Verkehr	Gebäude ²³
Einsatz von stofflichen Energieträgern (inkl. Biomasse)	Feedstocks in der Stahl- und Chemieindustrie	Interkontinentaler Luft- und Schiffsverkehr	Teilweise schwer sanierbare Gebäude
Technologiemix wahrscheinlich vorteilhaft	Hochtemperatur-Prozesswärme	Schwerlastverkehr Langstrecke Innereuropäischer Luft- und Schiffsverkehr	Fernwärmerzeugung (Großwärmepumpen: Elektrizität, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen: stoffliche Energieträger)
Einsatz von Elektrizität wahrscheinlich vorteilhaft	Mitteltemperatur-Prozesswärme	Öffentlicher straßengebundener Personenverkehr Leichte Nutzfahrzeuge Schwerlastverkehr Kurz- und Mittelstrecke	Sanierbare Gebäude
Einsatz von Elektrizität sicher	Niedertemperatur-Prozesswärme	Pkw-Verkehr, öffentlicher schienengebundener Personenverkehr	Neubauten

Tabelle 9: Zukünftig sinnvolle Nutzungsbereiche von Elektrizität und stofflichen Energieträgern, basierend auf den analysierten Szenarien

Zumindest mittelfristig werden **Wasserstoff und Wasserstoffderivate** wahrscheinlich nur in begrenzten Mengen verfügbar sein. Der notwendige Zubau an Elektrolyseleistung impliziert Ausbauraten oberhalb derer, die in der Vergangenheit bei der Photovoltaik realisiert wurden, und ist daher sehr ambitioniert. Zudem gehen die Szenarien davon aus, dass **größere Anteile des Wasserstoffs sowie der SynFuels importiert werden** können, letztere insbesondere aus dem nicht europäischen Ausland. Auch hier werden sehr ambitionierte Ausbaupfade für die Herstellung von SynFuels unterstellt. Die Szenarien sehen die Priorität für den Einsatz der begrenzten Kraftstoffe in den Bereichen, in denen realistische Alternativen fehlen (Industrie, Langstreckenverkehr).

²³ Für die Endenergie im Gebäudebereich kommen neben Elektrizität und stofflichen Energieträgern auch Solar- und Geothermie zum Einsatz. Vor allem der Geothermie ist dabei ein hohes Potenzial für die zukünftige Wärmeversorgung beizumessen.

Einordnung der Ergebnisse in Bezug auf langfristig erhöhte Erdgaspreise

Die in der Metaanalyse betrachteten Energiesystemstudien sowie die eigenen Szenarien-Rechnungen der AG mit dem Modell REMod wurden vor dem Ukrainekrieg und den damit verbundenen Entwicklungen auf den Rohstoffmärkten erstellt. Aus diesem Grund hat die AG im Nachgang zwei zusätzliche Szenarienrechnungen erstellt, um die mittel- bis langfristigen Auswirkungen der Energiekrise auf die Transformationspfade zur Klimaneutralität zu untersuchen. Es ist davon auszugehen, dass sich die Knappheitssituation mittelfristig entspannt, die Erdgaspreise jedoch langfristig auf einem deutlich höheren Niveau als vor der aktuellen Krise bleiben werden. Da Erdgas bisher in den meisten Energiesystemstudien eine wichtige Rolle als Brückentechnologie auf dem Weg zur Klimaneutralität spielte, ist das Ziel der Sensitivitätsbetrachtung, mögliche mittel- und langfristige Veränderungen in den Transformationspfaden aufgrund der gestiegenen Erdgaspreise zu untersuchen. Dazu wurde der im Modell angenommene Erdgaspreis von ursprünglich 23 €/MWh zunächst auf 70€/MWh und in einem weiteren Szenario auf 150 €/MWh erhöht. Alle anderen Parameter wurden vom Referenzszenario übernommen. Es zeigt sich, dass die Modellergebnisse auch bei einem erhöhten Gaspreisniveau relativ stabil bleiben. Abweichungen zeigen sich hauptsächlich für das Jahr 2030. Das klimaneutrale Zielsystem im Jahr 2045 ändert sich nur geringfügig, da hier ohnehin kein fossiles Erdgas mehr verwendet wird.

Signifikante Unterschiede im Erdgasverbrauch ergeben sich erst bei einer Erhöhung des Gaspreises auf 150 €/MWh. In diesem Szenario werden im Jahr 2030 im Modell insgesamt ca. 170 TWh Erdgas weniger verbraucht, was einer Einsparung um 22 Prozent gegenüber dem Referenzszenario entspricht. Es zeigt sich, dass in diesem Fall Teile des Erdgases durch Erdöl ersetzt werden. Dies betrifft vor allem die Hochtemperatur-Prozesswärme in der Industrie sowie Teile der Gebäudewärme. An der benötigten großen Ausbaugeschwindigkeit der erneuerbaren Energien sowie dem ambitionierten Hochlauf der Sektorkopplungstechnologien ändert dies jedoch im Grundsatz nichts. Im Gebäudebereich wird der Hochlauf der Wärmepumpen sogar weiter beschleunigt mit einer Million zusätzlicher Anschlüsse bis 2030.

Der Einfluss des Erdgaspreises auf die Stromerzeugung ist mittel- bis langfristig gering. Der Ersatz von flexiblen Gaskraftwerken zur Spitzenlastabdeckung durch Kohlekraftwerke lohnt sich aufgrund der langen Aufheizzeiten und den höheren CO₂-Emissionen im Jahr 2030 bei den angenommenen Gas- und CO₂-Preisen nicht. Dieses Ergebnis lässt allerdings keine Aussagen über den Bedarf an Kohlekraftwerken in den Jahren 2022 bis 2025 zur Sicherung der Energieversorgung zu. Im Szenario mit einem Preis von 150 €/MWh ist der Erdgasverbrauch des Stromsektors im Jahr 2030 um 25 TWh reduziert, aufgrund eines leicht verzögerten Hochlaufs der Elektromobilität. Mit zwanzig Millionen batterieelektrischer Fahrzeuge bis 2030 spielt die Elektromobilität jedoch auch in diesem Szenario eine wichtige Rolle.²⁴

Die Sensitivitätsanalyse gibt somit einen Hinweis auf die Robustheit der beschriebenen Transformationspfade für einen mittel- bis langfristigen Zeithorizont (2030 bis 2045). Für eine Analyse des kurzfristigen Zeithorizontes (2022 bis 2026) sei auf das ESYS-Impulspapier zum Thema Versorgungssicherheit hingewiesen.²⁵ Hier konnte unter anderem gezeigt werden, dass die Verfolgung eines ambitionierten Klimaschutzpfades mit einem schnellen Ausbau erneuerbarer Energien und klimafreundlicher Technologien sowohl das Strompreisniveau deutlich senken als auch zur Versorgungssicherheit mit Erdgas beitragen kann. Daher behalten die hier beschriebenen Handlungsfelder und Maßnahmen sowohl in der kurzen als auch in der langen Frist ihre Gültigkeit.

²⁴ Aktuell sind weniger als eine Million batterieelektrische Fahrzeuge in Deutschland zugelassen (<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/>).

²⁵ acatech/Leopoldina/Akademienunion 2022-1.

2.3 Ist eine klimaneutrale Energieversorgung vor 2045 durch schnelleren Technologiehochlauf oder eine Reduktion der Energienachfrage möglich?

Im Rahmen der Untersuchungen der Arbeitsgruppe wurden mit dem am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme entwickelten Energiesystemmodell REMod eigene Szenarien berechnet. Anhand der Szenarien wurde unter anderem untersucht, welche Rolle eine Reduktion der Nachfrage durch Effizienz und Suffizienz einerseits und ein schnellerer Technologieausbau vor allem auf der Angebotsseite (erneuerbare Energien, Wasserstofftechnologien) andererseits für die Entwicklung resilienter Transformationspfade spielen. Weiterhin wurde untersucht, inwieweit eine ambitioniertere Nachfragereduktion und ein schnellerer Technologieausbau Klimaneutralität schon vor 2045 ermöglichen.

Zu diesem Zweck wurden **ein Haupt- und drei Fokusszenarien** definiert. Das Hauptszenario trifft Annahmen zu Ausbauraten von angebotsseitigen Technologien und Effizienztechnologien, die die Fachkräfte der Arbeitsgruppe als umsetzbar ansehen. Die Annahmen der Fokusszenarien gehen darüber hinaus und unterstellen, dass in Teilbereichen besondere Anstrengungen unternommen werden, um die Transformationsgeschwindigkeit zu erhöhen:

- Im Szenario „Fokus Nachfragereduktion“ sinkt die Nachfrage nach Energiedienstleistungen durch Suffizienzmaßnahmen wie eine Verringerung der Wohnfläche, niedrigere Heiztemperaturen und eine Verringerung der Verkehrsleistung. Darüber hinaus wird in diesem Szenario in allen Sektoren eine massive Steigerung der Energieeffizienz angenommen. Die Annahmen zum Technologieausbau entsprechen dem Hauptszenario.
- Im Szenario „Fokus Technologieausbau“ werden Technologien schneller ausgebaut als im Hauptszenario angenommen. Dazu gehören ein schnellerer Ausbau der Windenergie, Photovoltaik und Wasserstofftechnologien, ein schnellerer Hochlauf von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen sowie eine höhere Kapazität für Gebäudesanierungen.
- Der dritte Fokus vereint die ambitionierten Annahmen aus „Fokus Nachfragereduktion“ und „Fokus Technologieausbau“.

Um in Deutschland Klimaneutralität 2045 zu erreichen, ist es sinnvoll, die energiebedingten Emissionen schon einige Jahre früher auf null zu bringen. Denn prozessbedingte Emissionen in der Industrie und Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft sind teilweise schwieriger zu vermeiden. Aus diesem Grund wurden alle vier Szenarien mit dem Ziel Klimaneutralität des Energiesystems bis 2045 und bis 2040 berechnet.

Für das Hauptszenario wird ab 2020 ein Emissionsbudget von 7,8 Gt CO₂ für energiebedingte Emissionen zugrunde gelegt. Für das Szenario zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2040 wird ein Budget von 6,2 Gt angesetzt. Das im Hauptszenario (2045) veranschlagte Emissionsbudget orientiert sich an dem im Bundes-Klimaschutzgesetz von 2021 vorgezeichneten Treibhausgasreduktionspfad. Die daraus abgeschätzten insgesamt ausgestoßenen Emissionen lassen sich mit den nationalen Restbudgets

vergleichen, die der Sachverständigenrat für Umweltfragen aus einer Pro-Kopf-Verteilung globaler Budgets ableitet und vorschlägt. Die auf dem Klimaschutzgesetz basierenden Szenarien entsprechen demnach in etwa einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,75 Grad Celsius. Sie übersteigen jedoch deutlich das Budget, das einem 1,5 Grad-Celsius-Pfad entspricht.²⁶ In einem zusätzlichen Szenario wird daher untersucht, wie sich Nachfrageentwicklung und Technologiehochlauf ändern müssten, um ein 1,5-Grad-Celsius-konformes CO₂-Budget bei Pro-Kopf-Gleichverteilung einzuhalten. Abbildung 10 gibt einen Überblick über die berechneten Szenarien. Die Klimaziele der jeweiligen Szenarien sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Annahmen und Ergebnisse der Szenarien sind in der dieser Stellungnahme zugrunde liegenden Analyse im Detail beschrieben.²⁷

Für die Nachfragereduktion sowie für den schnelleren Technologiehochlauf wurden bewusst extreme Annahmen gewählt, um den gesamten **Möglichkeitsraum von Transformationspfaden** auszuloten. Dies soll es ermöglichen, Was-wäre-wenn-Fragen zu beantworten wie zum Beispiel „Wie schnell müssen die erneuerbaren Energien ausgebaut werden, auch wenn es gelingt, die Nachfrage nach Energiedienstleistungen sehr stark zu reduzieren?“ und „Wann könnten wir Klimaneutralität erreichen, wenn es sowohl gelingt, die Nachfrage sehr stark zu reduzieren als auch Technologien noch schneller auszubauen, als Fachleute es für realistisch machbar halten?“.



Abbildung 10: Im Rahmen der Modellierung betrachtete Szenarien. Ausgehend von einem Hauptszenario wird einmal ein Pfad betrachtet, in dem der Fokus auf einem intensiveren Technologieausbau liegt und einmal auf einer stärkeren Nachfragereduktion. Zusätzlich werden diese beiden Pfade miteinander kombiniert (KN: Klimaneutralität).

²⁶ Sachverständigenrat für Umweltfragen 2022.

²⁷ Ragwitz/Weidlich 2023.

Szenario	Energiebedingte CO ₂ -Emissionen
Klimaneutralität 2045	Budget von 7,8 Gt _{CO2} mit -65 Prozent in 2030 und -100 Prozent in 2045
Klimaneutralität 2040	Budget von 6,2 Gt _{CO2} mit -65 Prozent in 2030 und -100 Prozent in 2040
Klimaneutralität 2035	Budget von 4 Gt _{CO2} , -100 Prozent in 2035

Tabelle 10: Klimaziele in den Szenarien. Das CO₂-Budget bezieht sich hier jeweils auf den Zeitraum ab 2020.

Die Szenarien zeigen: **Mit den zugrunde liegenden Annahmen aus dem Hauptszenario lässt sich ein klimaneutrales Energiesystem im Jahr 2040 nicht erreichen.** Es ist entweder eine starke Reduktion der Nachfrage oder ein gegenüber dem Hauptszenario – welches bereits ambitionierte Ausbauraten und Importe von SynFuels zugrunde legt – noch weiter beschleunigter Technologiehochlauf erforderlich. **Gelingt es nicht, die Nachfrage nach Energiedienstleistungen durch Suffizienz zu reduzieren, müssen insbesondere höhere Gebäudesanierungsraten mit großer Sanierungstiefe umgesetzt werden.** So werden im Szenario „Fokus Technologieausbau KN2040“ bis zum Jahr 2040 nahezu alle Gebäude saniert, ein Großteil davon mit der Sanierungstiefe KfW 40, was in etwa einem Passivhausstandard entspricht. Gelingt dies nicht, können die erneuerbaren Energien nicht schnell genug ausgebaut werden, um den Energiebedarf zu decken.²⁸ Selbst mit dieser sehr ambitionierten Gebäudesanierung sind bei Verzicht auf Suffizienzmaßnahmen im Jahr 2030 bereits mehr als 200 GW Photovoltaik, 125 GW Windenergie an Land und 30 GW Windenergie auf See erforderlich. Vor dem Hintergrund der niedrigen Ausbauraten in den letzten Jahren und vielfältigen Hemmnisse²⁹ für einen schnellen Ausbau erscheint es ungewiss, ob eine derartige Beschleunigung des Ausbaus gelingen wird.³⁰ Ob die erforderlichen Sanierungsraten und -tiefen des Szenarios „Fokus Technologieausbau KN2040“ erreicht werden können, erscheint ebenfalls fraglich.

Ein klimaneutrales Energiesystem 2045 lässt sich zwar mit den Annahmen aus dem Hauptszenario erreichen, aber auch hier erleichtert eine Reduktion der Nachfrage nach Energiedienstleistungen die Transformation erheblich. Die erforderlichen Ausbauraten der Windenergie an Land und die erforderlichen Importmengen von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern sinken. So lassen sich im Szenario „Fokus Nachfragereduktion“ gegenüber dem Hauptszenario mehr als 200 TW/h an Energieimporten einsparen. Der Transformationspfad wird resilienter, denn temporäre Zielverfehlungen in einzelnen Bereichen können durch Übererfüllung in anderen Bereichen ausgeglichen werden.

Nicht zuletzt **könnte eine aktive Suffizienzpolitik auch die Kosten der Transformation reduzieren.** Im Szenario „Fokus Technologieausbau KN2040“ kommen auch die teuersten Technologien – insbesondere Gebäudesanierung mit gro-

²⁸ Die exogen gesetzten Begrenzungen für die Ausbauraten der erneuerbaren Energien basieren auf historischen Daten, Anforderungen an Genehmigungsprozesse, Flächenverfügbarkeiten und Lieferketten. Eine weitere Beschleunigung ist gegebenenfalls möglich, wird jedoch zumindest kurz- bis mittelfristig als sehr unrealistisch eingeschätzt.

²⁹ Für eine ausführliche Analyse der Hemmnisse für den Wind- und PV-Ausbau sowie Handlungsoptionen, um diese zu überwinden, siehe acatech/Leopoldina/Akademienunion 2022-2.

³⁰ Die installierten Windenergie- und PV-Kapazitäten 2030 im Szenario KN 2040 entsprechen in etwa den aktuellen Zielen der Bundesregierung. In den meisten ausgewerteten Szenarien aus aktuellen Studien liegen die Ausbauraten bis 2030 jedoch deutlich darunter (siehe dazu Ragwitz/Weidlich 2023, Abschnitt 3.2.2).

ßer Sanierungstiefe – in sehr großem Umfang zum Einsatz. Eine Reduktion der Nachfrage nach Energiedienstleistungen reduziert nicht zuletzt auch den Ausbaubedarf bei erneuerbaren Energien und Flexibilitätstechnologien wie Speichern. Damit sinkt auch die Menge an erforderlichen Rohstoffen für die Errichtung der Anlagen.

Um einen angemessenen Beitrag Deutschlands zur Einhaltung des 1,5-Grad-Celsius-konformen CO₂-Budgets mit Pro-Kopf-Gleichverteilung des Budgets zu erbringen und Klimaneutralität bereits im Jahr 2035 zu erreichen, reicht selbst eine Kombination der Annahmen aus „Fokus Technologieausbau“ und „Fokus Nachfragereduktion“ nicht aus. Die energiebedingten Emissionen müssten bereits bis 2035 auf nahezu null reduziert werden. Dies ist nur möglich, wenn schon sehr kurzfristig die Nachfrage nach Energiedienstleistungen sehr stark reduziert wird und gleichzeitig viele Technologien noch schneller ausgebaut werden als im Szenario „Fokus Technologieausbau KN2040“ angenommen. So müssten in den Jahren bis 2030 jährlich 33 GW Photovoltaik und 16 GW Windenergie zugebaut werden. Zum Vergleich: Im Jahr 2020 waren es 1,4 GW Windenergie und 4,8 GW Photovoltaik. Bereits ab dem Jahr 2025 dürften keine Ölkessel, ab 2034 keine Gaskessel mehr zum Beheizen von Gebäuden eingesetzt werden. Dies bedeutet, dass **viele Heizungsanlagen vor Ablauf ihrer Lebensdauer ausgetauscht werden müssten**. Die für dieses Szenario notwendigen Ausbauraten und Umbaugeschwindigkeiten werden von den Fachkräften der Arbeitsgruppe als nicht oder kaum erreichbar eingeschätzt. Dies gilt ebenso für die Umsetzung der erforderlichen Verhaltensänderungen in der Breite der Gesellschaft im erforderlichen Tempo.

In der Gesamtschau zeigen die Szenarien: **Selbst für ein klimaneutrales Energiesystem bis 2045 ist ein sehr ambitionierter technologischer Umbau erforderlich**. Ohne eine gleichzeitige Reduktion der Nachfrage nach Energiedienstleistungen besteht kaum Spielraum, Zielverfehlungen in einzelnen Bereichen auszugleichen – der Transformationspfad ist „auf Kante genäht“. **Eine aktive Suffizienzpolitik würde die Resilienz des Transformationspfades erhöhen und es gleichzeitig ermöglichen, ein klimaneutrales Energiesystem bereits einige Jahre früher zu erreichen**. Diese Möglichkeit sollte angesichts der Tatsache, dass die bisherigen nationalen Klimaziele der Staaten in der Summe nicht ausreichen, um die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens zu erfüllen, dringend offengehalten werden.

2.4 Prozesse umstellen und Ressourcen schonen: Strategien zur klimaneutralen Industrie

Neben der absoluten Reduktion von Produktionsmengen (siehe 3.1 – Industrie) gibt es drei wesentliche Strategien, um Treibhausgasemission in der Industrie zu vermeiden:

- Kreislaufwirtschaft,
- Materialeffizienz und -substitution sowie
- Umstellung auf klimaneutrale Prozesse.

Die **energieintensiven Branchen Stahl, Chemie und Zement** sind für einen Großteil der industriellen Emissionen verantwortlich und werden daher in allen Studien ausführlich betrachtet. Die Studien zeigen sehr deutlich, dass Klimaneutralität in der Industrie eine große Herausforderung ist, die nicht durch einzelne Maßnahmen in einzelnen Branchen gestemmt werden kann. Vielmehr muss der genannte **Dreiklang aus klimaneutralen Prozessen, Kreislaufwirtschaft und Materialeffizienz** in jeder der drei energieintensiven Branchen angewandt werden. Tabelle 11 gibt eine Übersicht über die Ausprägung der drei Strategien in der Stahl-, Chemie- und Zementbranche. Die gleichen Prinzipien gelten jedoch auch in den weiteren energieintensiven Branchen wie der Nichteisenmetall-Industrie, der Glas- und Papierherstellung und anderen.

	Kreislaufwirtschaft	Materialeffizienz und Substitution	Klimaneutrale Prozesse
Stahl	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Sekundärstahlproduktion durch verbesserte Schrottverfügbarkeit • Produktdesign • Sortenreine Erfassung und Sortierung von Stahlschrott 	<ul style="list-style-type: none"> • Effizientes Produktdesign • Weniger Verschnitt in der Herstellung von Bauteilen • Leichtbauweise unter Verwendung von Textil- oder Carbonbeton 	<ul style="list-style-type: none"> • Umstellung der Hochofenroute auf die Direktreduktion mit Wasserstoff
Chemie	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanisches Recycling • Chemisches Recycling • Erhöhung des Anteils an Sekundärproduktion • Produktdesign, das die Wiederverwertbarkeit fördert (zum Beispiel Verpackungen aus einer einzigen Schicht, trennbare Verpackungsschichten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Produktdesign, zum Beispiel materialeffiziente Verpackungen 	<p>Ammoniak</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umstellung von Erdgas auf Wasserstoffroute <p>High Value Chemical (HVC)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umstellung von Steamcracking auf Methanol-to-Olefines-Route • Gegebenenfalls Elektrifizierung von Steamcrackern <p>Dampferzeugung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umstellung auf Wasserstoff, Biomasse oder direkte Elektrifizierung
Zement	<ul style="list-style-type: none"> • Sortenreine Abfallströme • Verpflichtender selektiver Rückbau von Bauwerken • Recyclinggerechte Baukonstruktion und Produktdesign • Verwendung von Betonbrechsanden als alternative Zuschlagstoffe sowie perspektivisch Wiedereinsatz als Binder 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion des Klinkeranteils im Zement durch alternative Zuschlagstoffe • Reduktion des Zementanteils im Beton bei gleichbleibender Festigkeit • Effizienter Einsatz von Beton durch Carbon-Beton und Bauteilgeometrie • Innovative Betone mit Zementalternativen • Substitution von Beton durch Holz und andere organische Stoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Brennstoffumstellung auf Biomasse oder Wasserstoff • Abscheidung und geologische Speicherung (CCS) von Prozessemissionen (und Brennstoffemissionen zum Beispiel bei der Müllverbrennung)

Tabelle 11: Ausgestaltung des Dreiklangs Kreislaufwirtschaft, Materialeffizienz/-substitution und klimaneutrale Prozesse in den beispielhaften Industrien Stahl, Chemie und Zement

2.1.8 Kreislaufwirtschaft

Zum Thema Kreislaufwirtschaft herrscht vor allem in der Stahlindustrie eine hohe Klarheit in der Studienlage. Es wird als essenziell angesehen, den Recyclinganteil der Stahlproduktion so weit wie möglich zu erhöhen. Stahlrecycling ist wesentlich energieeffizienter als die Primärproduktion und verfügt mit dem Elektrolichtbogen über ein ausgereiftes elektrisches Verfahren, welches seit Jahren angewendet wird. **In der verbesserten Erfassung von Sekundärmaterialien ist daher einer der wesentlichen Ansatzpunkte für politisches Handeln zu sehen** (Handlungsfeld 17.2). Auch in der Nichteisenmetall-Industrie (zum Beispiel Aluminium und Kupfer) kann die Erhöhung des Anteils der Sekundärproduktion als robuster Pfad identifiziert werden.

Die Ausgangslage in der Chemieindustrie ist heterogener und die Komplexität der Vielzahl von Produkten und Prozessen ist schwierig in Modellen abzubilden. Besonders bei der Produktion von High Value Chemical (HVC) wird das chemische Recycling nur in zwei Studien berücksichtigt. Das weniger energieintensive mechanische Recycling wird in den meisten Studien nur als Annahme zu Reduktion von Produktionsmengen reflektiert. Die Auswirkung beziehungsweise der Beitrag von Kreislaufwirtschaft in der chemischen Industrie sind aus den Studien heraus daher schwer zu quantifizieren. Qualitativ sind sich jedoch alle Studien einig, dass Maßnahmen für ein verstärktes Recycling von Kunststoffabfällen die Prozessumstellungen in der chemischen Industrie flankieren müssen. **Zu diesen Maßnahmen zählen Herstellungsstandards, die das Sortieren und Recyceln von Kunststoff- und Metallabfällen erleichtern** (Handlungsfeld 17.1).

2.1.9 Materialeffizienz und Substitution

In den betrachteten Studien werden konkrete Maßnahmen zur Materialeffizienz insbesondere in der Zementindustrie thematisiert. Materialeffizienz ist hier ein wesentlicher Hebel zur Reduktion von Prozessemissionen und kann in drei Stufen entlang der Produktions- beziehungsweise Wertschöpfungskette erfolgen: Reduktion des Klinkeranteils in Zement durch alternative Zuschlagstoffe, Reduktion des Zementanteils in Beton sowie effizienterer Einsatz von Beton in Bauteilen beispielsweise durch intelligente Bauteilgeometrien oder den Einsatz von Carbonbeton statt Stahlbeton. Auch die Substitution spielt in der Zementindustrie eine Rolle, wobei sowohl der Ersatz des emissionsintensiven Zementklinkers durch innovative Zementsorten als auch der Ersatz von Beton als solches beispielsweise durch Holzbauweise thematisiert werden. **Für die Umsetzung der genannten Schritte müssen zum einen Transparenz und Anreize geschaffen** (Handlungsfeld 18.1) **und zum anderen die regulatorischen Rahmenbedingungen zum Beispiel im Bereich der Baunormen angepasst werden** (Handlungsfeld 18.2). Neben der Relevanz für die schwer vermeidbaren Prozessemissionen hilft der effiziente Einsatz von Materialien in allen Branchen, den Energiebedarf zu senken. In den Studien wird dies durch sinkende Produktionsmengen abgebildet.

2.1.10 Umstellung auf klimaneutrale Prozesse

Für die Umstellung auf klimaneutrale Prozesse in der Industrie gibt es einige robuste Pfade, die von allen Studien gleichermaßen aufgezeigt werden. Ein Beispiel für einen solchen robusten Pfad ist die Transformation in der Stahlindustrie. Alle Studien geben eine vollständige Umstellung der bisher vorherrschenden Hochofenroute auf die was-

serstoffbasierte Direktreduktions-Route bis zum jeweiligen Zieljahr 2045 beziehungsweise 2050 an. Auch in der Grundstoffchemie zeichnet sich die Methanol-to-Olefins-Route für eine teilweise bis vollständige Umstellung der Produktion von High-Value Chemicals (HVC) ab. In beiden Fällen werden vor allem die Reinvestitionszyklen eine große Rolle spielen. **Die Studien sind sich einig, dass diese Transformation jetzt beginnen muss und Reinvestitionen beispielsweise in konventionelle Hochöfen vermieden werden müssen** (Handlungsfeld 16.3).

Beide Beispiele zeigen deutlich die wichtige Rolle von Wasserstoff und SynFuels (zum Beispiel Methanol) in der Industrie. **Im Bereich der rohstofflichen Nutzung ist dies eine No-Regret-Option** (Handlungsfeld 16.1 und 16.2). Doch auch im Bereich der Hochtemperaturprozesswärme wird in den Studien zum Teil eine große Rolle für Wasserstoff und SynFuels gesehen, wobei deren energetische Bedarfe stark mit dem Einsatz von Biomasse zusammenhängen. Einige Studien sehen anstelle von Wasserstoff die Nutzung von Biomasse – etwa für die Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme – und häufig in Kombination mit Biomasse-basierter CO₂-Abscheidung und -speicherung (BECCS) als negative Emissionstechnologie. Es gibt jedoch auch Studien (*BMW 2021, Ariadne 2021*), die nennenswerte Beiträge durch Biomasse im Verkehrssektor in Form von Biokraftstoffen vorsehen. Daher lassen sich aus den Studien noch keine klaren Einsatzbereiche des begrenzt verfügbaren Rohstoffs Biomasse ableiten.

Ob und in welchem Umfang auch die direktelektrische Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme, zum Beispiel über elektrische Drehrohröfen in der Zementindustrie, zum Tragen kommt, ist stark von den jeweiligen Annahmen zu Technologieverfügbarkeit und -ökonomie abhängig. Diese Annahmen variieren stark zwischen den Studien, aber auch innerhalb einzelner Studien können je nach Schwerpunktsetzung der Szenarien unterschiedliche Annahmen getroffen werden. **Zu den Verfügbarkeiten und ökonomischen Parametern von Technologien sollte weiter geforscht werden, um Klarheit zu schaffen** (Handlungsfeld 16.4).

In der Nieder- und Mitteltemperaturprozesswärme zeigen die Studien deutlich die Rolle der Direktelektrifizierung mittels Wärmepumpen. **Der Zugang zu günstigem erneuerbarem Strom für die Industrie hat daher eine hohe Priorität** (Handlungsfeld 16.3 sowie 3.2). Darüber hinaus spielen in der Industrie auch Fernwärme und abfallbasierte Brennstoffe eine wichtige Rolle zur Prozesswärmebereitstellung.

Neben den konkreten Prozessumstellungen in den einzelnen Branchen stellen die Studien die Bedeutung von Energieeffizienzsteigerungen der Querschnittstechnologien (Pumpen, Beleuchtung etc.) heraus. Zudem steigt die Effizienz wie auch in den anderen Sektoren durch den erhöhten Einsatz direktelektrischer Technologien. Infolgedessen sinkt in allen Studien (außer *Jülich 2021*) die Endenergienachfrage im Industriesektor.

2.5 Schwer vermeidbare Treibhausgase langfristig binden: CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre

Die betrachteten Klimaschutzszenarien für Deutschland zeigen, dass **Klimaneutralität zur Mitte dieses Jahrhunderts nur erreicht werden kann, wenn CO₂ aus der Atmosphäre entfernt und gespeichert wird**. Insbesondere Nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft sowie prozessuale Emissionen aus der Industrie sind zum Teil nicht oder nur sehr schwer vermeidbar und machen den Einsatz von CO₂-Entnahmeverfahren erforderlich. Darüber hinaus zeigen globale Szenarien des Weltklimarats IPCC, dass langfristig über den Ausgleich schwer vermeidbarer Emissionen hinaus netto-negative³¹ CO₂-Emissionen erreicht werden müssen, um den Temperaturanstieg nach einer zwischenzeitlichen Überschreitung wieder auf höchstens 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Der wesentliche Grund dafür ist, dass das für eine Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,5 Grad Celsius verbleibende globale CO₂-Budget inzwischen derart gering ist, dass selbst in ehrgeizigen Klimaschutzszenarien die Reduktion der Treibhausgasemissionen nicht mehr schnell genug gelingt, sodass zu viel emittiertes CO₂ wieder aus der Atmosphäre entfernt werden muss.³²

Für die CO₂-Entnahme eignen sich verschiedene Verfahren mit unterschiedlichen Wirkungsweisen. Im Rahmen der hier zugrunde liegenden Analyse³³ wurden sechs **CO₂-Entnahmeverfahren** betrachtet:³⁴

- Aufforstung
- Kohlenstoffbindung im Boden
- Einsatz von Biokohle
- Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)
- Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)
- Beschleunigte Verwitterung

Diese Verfahren unterscheiden sich unter anderem im jeweiligen Speichermedium: Im Zuge von Aufforstungsmaßnahmen, der Kohlenstoffbindung im Boden, dem Einsatz von Biokohle und der beschleunigten Verwitterung wird CO₂ in festen Kohlenstoffverbindungen in der Vegetation oder im Boden gespeichert. Bei DACCS und BECCS findet die Speicherung in Form von CO₂ statt, welches im Untergrund verpresst wird.³⁵

Weitere Unterschiede bestehen hinsichtlich der (prognostizierten) Kosten, des Potenzials zur Menge der CO₂-Speicherung, der Dauer der Kohlenstoffbindung, möglicher Umweltauswirkungen, des technologischen Reifegrads und der gesellschaftlichen Akzep-

31 Netto-negativ bedeutet, dass insgesamt mehr CO₂ aus der Atmosphäre entnommen wird, als noch ausgestoßen wird. Siehe auch Erlach et al. 2022.

32 IPCC 2022.

33 Erläuterung der Verfahren siehe Ragwitz/Weidlich 2023.

34 Neben diesen sechs Verfahren gibt es weitere Verfahren, etwa Ozeandüngung und Ozeanalkalisierung, die jedoch insbesondere aufgrund ihrer Umweltauswirkungen stark umstritten sind und daher nicht näher berücksichtigt wurden.

35 Siehe auch Erlach et al. 2022 für eine tiefere Beschreibung der CO₂-Entnahmeverfahren.

tanz. Da die meisten Verfahren sich noch im frühen Entwicklungsstadium befinden, können für viele dieser Parameter nur Schätzungen getroffen werden, doch einige Risiken und Nutzungskonkurrenzen zeichnen sich bereits ab und werden im Folgenden skizziert.

Waldflächen, die heute bereits in großen Mengen CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen und in vielen Szenarien auch künftig erheblich zur CO₂-Entnahme beitragen, können eine dauerhafte Speicherung des CO₂ nicht sicherstellen. Aufgrund menschlicher Eingriffe (zum Beispiel Abholzung) und weiterer Risiken, wie zum Beispiel Feuer und Schädlingsbefall, die durch den menschengemachten Klimawandel verstärkt werden, ist die Speicherung zudem in hohem Maße reversibel, das gespeicherte CO₂ könnte also wieder in die Atmosphäre freigesetzt werden. **Vor diesem Hintergrund sollten klare Regeln für das Accounting, das heißt die Anrechnung der CO₂-Entnahmeleistung, von CO₂-Entnahmeverfahren definiert werden** (Handlungsfeld 20.2).

In die Bewertung der jeweiligen CO₂-Entnahmeverfahren sollten neben ökonomischen und ökologischen Aspekten auch Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Verfahren, dem Energiesystem sowie der Land- und Forstwirtschaft einfließen. Der Großteil der dargestellten CO₂-Entnahmeverfahren weist einen hohen **Flächenbedarf** auf. Die unterschiedlichen Verfahren könnten somit um Flächen konkurrieren – denkbar wäre etwa eine Konkurrenzsituation zwischen Aufforstung und dem Anbau von Biomasse für BECCS. Um Biomasse bestehen auch innerhalb des Gesamtenergiesystems Konflikte, da sie statt für BECCS für andere energetische Zwecke eingesetzt werden könnte – insbesondere als Biokraftstoff im Verkehrssektor. Es können auch Nutzungskonkurrenzen zwischen CO₂-Entnahmeverfahren und der Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie dem Anbau nachwachsender Rohstoffe für die stoffliche Nutzung entstehen. Nicht zuletzt kann der erhöhte Nutzungsdruck auf Landflächen auch zu Konflikten mit dem Schutz von Ökosystemen und der Artenvielfalt führen.

Direct Air Capture geht aufgrund der niedrigen CO₂-Konzentration in der Luft mit einem hohen Energiebedarf einher. Sofern noch nicht die gesamte Energieversorgung auf erneuerbare Energien umgestellt ist, kann dies zu einer gesteigerten Nachfrage nach fossilen Energieträgern führen.

Angesichts der Nutzungskonkurrenzen um Flächen, Biomasse oder Energie, aber auch der dargestellten negativen Umweltauswirkungen oder möglicher fehlender gesellschaftlicher Akzeptanz zeigt sich, dass alle CO₂-Entnahmeverfahren im Potenzial limitiert und mit noch näher zu erforschenden Risiken verbunden sind. **In den kommenden Jahren wird es daher darauf ankommen, die ökologische, ökonomische, technische und gesellschaftliche Bewertung der Verfahren zu vertiefen** (Handlungsfeld 20.3). **Bei entsprechender Eignung der Verfahren sollte ein regulatorischer Rahmen geschaffen werden, der die Entwicklung und den Einsatz der verschiedenen CO₂-Entnahmeverfahren anreizt und reguliert** (Handlungsfeld 20.4).

Nicht zuletzt sollte die Aussicht auf künftige negative Emissionen nicht dazu führen, Maßnahmen zur Treibhausgasreduzierung zu vernachlässigen. **Die Entwicklung und der Einsatz von CO₂-Entnahmeverfahren sollten daher in einen gesamtsystemischen Ansatz eingebettet werden, in dem die Rolle von CO₂-Entnahme klar definiert ist – zum Beispiel durch separate Vermeidungs- und Entnahmeziele** (Handlungsfeld 20.1).

Alle im Rahmen dieser Analyse untersuchten Studien kommen in ihren Szenarien zu dem Ergebnis, dass CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre erforderlich ist. Sie unterscheiden sich aber im Umfang der CO₂-Entnahme (entsprechend der jeweiligen Residualemissionen) sowie der eingesetzten Verfahren. Die Studien legen stark unterschiedliche Annahmen für die künftige Senkenleistung des LULUCF-Sektors³⁶ zugrunde. Dies unterstreicht die Schwierigkeiten, die die Bilanzierung des LULUCF-Sektors aufgrund der Reversibilität der CO₂-Entnahme mit sich bringt. Mit Ausnahme der Rescue-Studie des Umweltbundesamtes nutzen sieben von acht Studien die technischen CO₂-Entnahmeverfahren BECCS und DACCS. Sämtliche dieser Szenarien setzen BECCS ein, zum Teil bereits ab 2030. DACCS kommt nur in drei der Szenarien zum Einsatz und zeigt generell einen späteren und langsameren Markthochlauf (mit Ausnahme der Studie des Forschungszentrum Jülich).

In dem Großteil der untersuchten Szenarien kommt die geologische Einlagerung von CO₂ (CCS) auch zur Abscheidung fossiler CO₂-Emissionen aus der Zementindustrie und der chemischen Industrie zum Einsatz, womit – im Gegensatz zu BECCS und DACCS – keine negativen Emissionen erzielt werden, sondern lediglich Emissionen vermieden werden. Die Szenarien sehen CCS ausschließlich für Prozessemissionen vor, die sich anders nicht vermeiden lassen. In den untersuchten Szenarien ist CCS ausdrücklich nicht dafür vorgesehen, Emissionen aus fossilen Kraftwerken auszugleichen. Es ist wichtig, dies in der öffentlichen Debatte zu betonen, da CCS in früheren Studien teilweise als Möglichkeit gesehen wurde, Emissionsneutralität unter Beibehaltung einer fossilen Stromerzeugung zu erreichen; heutige Studien hingegen setzen langfristig ausnahmslos auf eine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Doch auch bei der **Nutzung von CCS nur für Prozessemissionen braucht es einen breiten gesellschaftlichen Diskurs hinsichtlich des Nutzens, der Herausforderungen und der Risiken dieser Option** (Handlungsfeld 21.1).

Der Hochlauf der CCS-Technologie sollte dabei aufgrund unterschiedlich guter Standortbedingungen für das Auffangen von CO₂ und die CO₂-Speicherung früh europäisch und international gestaltet werden. **Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die dafür notwendige CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur** (Handlungsfeld 21.2).

Kohlenstoff wird als Rohstoff für die Herstellung zahlreicher Produkte verwendet und auch langfristig benötigt, etwa für Kunststoffe, Medikamente und Düngemittel. Um eine treibhausgasneutrale Energieversorgung und industrielle Produktion zu ermöglichen, müssen in den kommenden Jahren nachhaltige, geschlossene Kohlenstoffkreisläufe aufgebaut werden. Mögliche Quellen für nachhaltigen Kohlenstoff sind Biomasse oder CO₂, das aus der Atmosphäre (DACCU, Direct Air Carbon Capture with Utilisation) beziehungsweise aus Biomasse (BECCU, Bioenergy with Carbon Capture and

³⁶ Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (Land Use, Land-Use Change and Forestry).

Utilisation) gewonnen wurde. Wird hingegen CO₂ genutzt, das ursprünglich aus fossilen Rohstoffen oder chemischen Prozessen stammt, ist die Gesamtkette nicht CO₂-neutral, da mit Ende der Produktlebenszeit das CO₂ in die Atmosphäre gelangt. CCU mit CO₂ aus fossilen Quellen kann dennoch zum Klimaschutz beitragen und mittelfristig als Übergangstechnologie sinnvoll sein, wenn dadurch Prozesse mit höheren CO₂-Emissionen ersetzt werden. Perspektivisch werden aber auch diese fossilen CO₂-Quellen durch CO₂ aus Biomasse oder aus der Umgebungsluft ersetzt werden müssen, um zu einem klimaneutralen Gesamtsystem zu gelangen. **Die einzelnen CCU-Prozesse sind daher differenziert zu betrachten und sollten entsprechend ihrer jeweiligen Klimawirkung in einen rechtlich-ökonomischen Rahmen eingefügt werden** (Handlungsfeld 22.1).

3 Übergreifende Handlungsoptionen

Im Folgenden werden solche Handlungsfelder beschrieben, die sich nicht einem der Unterthemen aus den Kapiteln der Analyse (Energienachfrage, Transformationspfade des Energiesystems, klimaneutrale Industrie sowie negative Emissionen) zuordnen lassen, sondern übergreifend wirken und mit Blick auf das Gesamtsystem ausgestaltet werden müssen.

Für einige der vorgestellten Maßnahmen und Instrumente liegt noch keine umfangreiche wissenschaftlich fundierte Bewertung von Effektivität, Kosten und Nebenwirkungen vor. Solche Wissenslücken sollten nach Möglichkeit durch weitere Forschung geschlossen werden, sodass ein evidenzbasiertes Impact-Assessment vor der Einführung von Maßnahmen ermöglicht wird und potenziell sinnvolle Maßnahmen nicht ausgeschlossen werden, weil beispielsweise Studien zu deren Effektivität noch fehlen. Dies gilt ebenso für die in Kapitel 4 bis 7 vorgestellten Handlungsfelder.

Handlungsfeld 1:

Zielbegriff und Lösungsraum für eine nachhaltige Energiewende erweitern

HF 1.1 Suffizienz, Effizienz, Konsistenz: alle Strategien für die Energiewende nutzen

Es werden meist drei Kernstrategien unterschieden, um Nachhaltigkeit zu erreichen: Suffizienz, Effizienz und Konsistenz. „Suffizienz“ wird der Nachfrageseite zugeordnet und meint dort einen Rückgang des Verbrauchs an Energiedienstleistungen. Die eher technologieorientierte Strategie der „(Energie)Effizienz“ nutzt die Erhöhung des Wirkungsgrades mit technischen Mitteln, mit dem Ziel, eine bestimmte Energiedienstleistung mit weniger Energieeinsatz bereitzustellen. Während Effizienz auf eine *relative* Reduktion des Energieverbrauchs im Verhältnis zur bereitgestellten Energiedienstleistung abzielt und technischer Natur ist, zielt der Suffizienz auf die *absolute* Reduktion des Gebrauchs von Energiedienstleistungen ab – unter anderem durch soziale Innovationen und Veränderung sozialer Praktiken. Die Strategie „Konsistenz“ beinhaltet die Nutzung regenerativer Ressourcen anstelle fossiler sowie die Schließung von Materialkreisläufen. Alle drei Strategien leisten wichtige Beiträge zur Klimaneutralität.

Angesichts des ambitionierten Gesamtvorhabens Klimaneutralität ist es erforderlich, alle drei Strategien gleichzeitig anzuwenden. So würde beispielsweise die Konzentration auf vorwiegend technische Lösungen große Risiken bergen, das Ziel zu verfehlen. Alle drei Strategien zu berücksichtigen, kann hingegen Synergien schaffen und helfen, weitergefasste Nachhaltigkeitsziele zu erreichen, da eine Verbrauchsreduktion (durch Verhaltensänderung) den Ressourcen- und Flächenbedarf der Systemtransformation reduziert.

HF 1.2 Globale Perspektive berücksichtigen

Deutschlands Weg zur Klimaneutralität und die Energiewende bedürfen notwendigerweise Entscheidungen und Handlungen vor Ort, haben jedoch darüber hinaus eine globale Dimension. Dies betrifft Faktoren wie Technologieentwicklung, Wettbewerbsfähigkeit, den Verbrauch globaler Ressourcen oder die nachhaltige Sicherung globaler Lieferketten.³⁷

Derzeit berücksichtigen die Emissionsbilanzen Deutschlands die im Land liegenden Emissionsquellen (Territorialprinzip beziehungsweise Quellenprinzip). Eine **Bilanzierung nach Verursacher- oder auch Inländerprinzip** hingegen bilanziert alle Emissionen, die durch die Bevölkerung, die in dem betreffenden Gebiet lebt, verursacht werden. Dadurch ist auch erkennbar, wie groß die Emissionen der in Deutschland konsumierten Güter sind, da „graue Emissionen“ miterfasst werden, etwa die Klimawirkung der Herstellung von nach Deutschland importierten Baustoffen und Konsumgütern. Die dem Verbrauch eines Landes zugrunde liegenden Emissionen sind ein wichtiger Anhaltspunkt, um zu bewerten, welcher Energiewendepfad nicht nur Klimaneutralität auf Deutschland bezogen erreicht, sondern auch den globalen Klimapfad unterstützt. Um bewusste Entscheidungen über den globalen Beitrag zum Klimaschutz treffen zu können, ist somit die Bilanzierung von Emissionen nach dem Verursacherprinzip, also die Einbeziehung von „grauen Emissionen“ zusätzlich zur jährlichen Bilanz nach Territorialprinzip, sinnvoll. Einen solchen Schritt plant derzeit Schweden und diskutiert einen entsprechenden Vorschlag im Parlament.

HF 1.3 Weitere ökologische Wirkungen berücksichtigen

Ressourcen und Flächen sind auf der Erde begrenzt, und neben der Klimakrise bestehen **weitere ökologische Belastungsgrenzen**, deren Überschreitung die Lebensgrundlagen gefährdet. Szenarienstudien, die Transformationspfade zur Klimaneutralität für Deutschland aufzeigen, zielen in der Regel lediglich auf die kostenoptimierte Reduktion der national bilanzierten Treibhausgasemissionen. Energiesysteme haben jedoch auch starke Auswirkungen auf andere ökologische, soziale und ökonomische Dimensionen (im Inland und über nationale Grenzen hinaus, wie im vorigen Abschnitt erläutert). Ein besonders kritisches Beispiel hierfür ist der Verlust der biologischen Vielfalt, welche stark vom Ressourcen- und Flächenverbrauch beeinflusst wird. Die ökologische Perspektive sollte bei der Bewertung von Transformationspfaden im Sinne einer multikriteriellen Betrachtung berücksichtigt werden. Dies erhöht die Komplexität der Analyse und Bestimmung „optimaler“ Pfade – dennoch sollte es das Ziel sein, insbesondere Flächen- und Ressourcenverbräuche in Szenarienstudien als relevante Faktoren mit abzubilden und Transformationsstrategien der Energiewende auch in diesen Dimensionen zu bewerten.

Konkret für die Energie- und Klimapfade bedeutet dies, **auch für die geplanten und erhofften Importe von SynFuels Klima- und Nachhaltigkeitskriterien zu erarbeiten und anzuwenden**. Nur wenn die Importe auf Basis treibhausgasar-

³⁷ Um die Zuverlässigkeit von Lieferketten zu erhöhen, wird diskutiert, inwieweit es sinnvoll ist, für wichtige Komponenten wie PV-Module den Aufbau einer Produktion in Deutschland oder Europa staatlich zu fördern, um die Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern zu reduzieren (siehe ESYS-Stellungnahme acatech/Leopoldina/Akademienunion 2022-2). Auch für kritische Rohstoffe ist Förderung in Europa eine Option zur Diversifizierung der Bezugsquellen (siehe ESYS-Stellungnahme acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-2). Ein weiterer Vorteil der Produktion in Europa gegenüber Importen ist, dass hohe Umwelt- und Sozialstandards einfacher sichergestellt werden können.

mer Technologien und ab 2045 auch klimaneutral erzeugt werden und die Klimaneutralität des exportierenden Landes sich dadurch nicht verzögert, können Importe Teil einer deutschen Klimaschutz-Strategie sein, die ihrem Beitrag zum globalen Klimaschutz gerecht wird. Importkriterien sollten vielfältige Nachhaltigkeitskriterien umfassen, sowohl in Bezug auf Ressourcen- und Flächenverbrauch als auch im Hinblick auf soziale Fragen. Dabei ist zu prüfen, welche Vereinbarungen für Importe von SynFuels bereits heute eingeleitet werden können.

Handlungsfeld 2:

Energiewende als gesellschaftlichen Prozess gestalten

HF 2.1 Ziele und Transformationspfade der Energiewende als gesellschaftlichen Wandlungsprozess formulieren

Die Transformation des Energiesystems geht als gesellschaftlicher Wandlungsprozess über technologische und wirtschaftliche Aspekte hinaus. Die Analyse und Bewertung möglicher Transformationspfade hinsichtlich ihrer klimarelevanten Ziele, technischen Ausgestaltung und systemischen Zusammenhänge sowie der wirtschaftlichen Kosten stellt eine zentrale Grundlage für den politischen Gestaltungsprozess dar. Der damit einhergehende gesellschaftliche Prozess darf jedoch nicht nachgelagert diskutiert werden, beispielsweise in Bezug auf die soziale Akzeptanz der technologischen Bausteine für die Energiewende.³⁸ Vielmehr muss die Energiewende grundsätzlich integriert gedacht werden, indem **gesellschaftliche, soziale, institutionelle und kulturelle Aspekte** von vornherein diskutiert und adressiert werden.

Die Energiewende als maßgeblich technologische Transformation zu diskutieren, greift daher zu kurz. Vielmehr sollte sie auch vom Ende her gedacht werden: als gestaltbare Zukunft, die die Lebensqualität in den Mittelpunkt stellt. So können die Verkehrswende im Allgemeinen und der Übergang von Verbrennungsmotoren hin zur E-Mobilität im Besonderen auch als ein Gelegenheitsfenster genutzt werden, Alternativen wie den Radverkehr zu stärken und dabei die Lebensqualität in Städten zu verbessern. Im Gebäudebereich sind Sanierungsmaßnahmen und der technologische Umstieg vor allem auf Wärmepumpen zentrale Bestandteile der Systemtransformation; gleichzeitig sollte aber auch die weitergehende Frage adressiert werden, welche Wohnformen die Bedarfe in den jeweiligen Lebenssituationen erfüllen und wie diese auch unter Nutzung gemeinschaftlicher und öffentlicher Räume geschaffen und gefördert werden können. Oftmals ist eine solche bedarfsgerechte und flexiblere Nutzung von Wohnraum gleichzeitig auch die klimafreundlichere Option. Im Konsumbereich wiederum werden langlebige und reparaturfreundliche Produkte stärker nachgefragt, wenn sich ihre Ressourcen- und Klimafreundlichkeit auch in den Preisen widerspiegelt und die Reparatur die einfachere und günstigere Variante ist als der Neukauf.

Energiedienstleistungen wie beheizter Wohnraum oder Mobilität sind einerseits essenziell für die Lebensqualität, andererseits können ihre Auswirkungen Lebensqualität mindern, zum Beispiel durch Klimawandelfolgen, Schadstoffbelastungen, Unfallgefahren im Verkehr. Da die Transformation des Energiesystems optimalerweise diese

³⁸ Einflussfaktoren auf die Akzeptanz des Windenergie- und Photovoltaikausbaus werden ausführlich diskutiert in der ESYS-Stellungnahme „Wie kann der Ausbau von Photovoltaik und Windenergie beschleunigt werden?“ (acatech/Leopoldina/Akademienunion 2022-2).

beiden Seiten gerecht für alle austarieren sollte, ist die Frage der Energiewende nicht nur eine technische, sondern auch eine gesellschaftliche Frage: „Wie wollen wir leben?“ „Welche Zukunft ist wünschenswert?“ Hierbei ist zu beachten, dass auch eine solche gesamtgesellschaftlich gedachte Energiewende zumindest zeitweise Härten verursachen kann, unter denen einige Bevölkerungsgruppen mehr leiden als andere. Höhere Energiepreise treffen Haushalte mit geringem Einkommen stärker, und die Transformation von Wirtschaftszweigen ist regional ungleich verteilt. Um den gesellschaftlichen Zusammenhalt nicht zu gefährden, ist bei allen Maßnahmen zwingend zu prüfen, ob daraus soziale Härten erwachsen können und wie diese abgefangen werden können.

HF 2.2 Rahmenbedingungen schaffen, damit energiesparendes Verhalten zur nahe- liegenden Option wird

Der Ausbau erneuerbarer Energien oder die Implementierung von Energieeffizienzmaßnahmen ist maßgeblich von politischen Rahmenbedingungen abhängig. Gleiches gilt für Strategien zur Reduktion des absoluten Energieverbrauchs durch Suffizienz. Konsumententscheidungen sind durch bestehende Rahmenbedingungen, Denkmuster und gesellschaftliche Verhältnisse geprägt und daher nur bedingt von den einzelnen Personen beeinflussbar. Moralische Appelle oder Informationskampagnen können daher zwar einen Beitrag zum nachhaltigen Energiesparen leisten, führen aber in der Regel nicht zu breiten, dauerhaften und tiefgreifenden Änderungen. Dennoch kann eine Reduktion des Energieverbrauchs durch **gesellschaftliche Trends** befördert werden. Bereits heute gibt es **Pioniergruppen** in der Bevölkerung, die energie- und ressourcenschonende Verhaltensweisen praktizieren und damit einen wichtigen Beitrag zum Bewusstsein für nachhaltige Lebensstile leisten. Diese Entwicklungen können sich beispielsweise durch ein wachsendes gesellschaftliches Bewusstsein für die Klimakrise auch unabhängig von politischen Rahmensetzungen verstärken und werden durch Suffizienzstrategien zusätzlich unterstützt.

Gegenwärtig fördern geltende Rahmenbedingungen oftmals individuelle Verhaltensweisen und Konsumententscheidungen mit hohem Energieverbrauch. Dies betrifft beispielsweise Steuererleichterungen für weite Wege zum Arbeitsplatz in Kombination mit hohen Wohnungspreisen in Städten, Subventionen für Flugbenzin, die die Flugreise zur günstigeren Alternative machen, oder auf den Autoverkehr ausgerichtete Städte, die den Umstieg aufs Fahrrad oder den öffentlichen Verkehr weniger attraktiv machen. Rahmenbedingungen für energiesparendes oder allgemein umweltfreundliches Verhalten erfordern einen politischen Instrumentenmix, der ökonomische und steuerliche Anreize ebenso umfasst wie Informationsmaßnahmen, Bildung, Forschung und Ordnungspolitik. Zur absoluten Reduktion des Energieverbrauchs bedarf es auch einer **aktiven Suffizienzpolitik von der kommunalen bis zur europäischen Ebene**, die klima- und ressourcenschonendes Verhalten ermöglicht und zur neuen Normalität, zur attraktiveren und naheliegenderen Variante macht. Beispielsweise können autofreie Stadtgebiete die Wohnqualität erhöhen, indem Lärm und Schadstoffemissionen gesenkt und die Verkehrssicherheit erhöht werden. Diese Vorteile überwiegen mithin nur dann, wenn Anwohner*innen bequem ohne ein eigenes Auto auskommen können und somit keine Mobilitätseinbuße haben. Suffizienzorientierte Politik erfordert also eine entsprechende Planung und auch die Bereitstellung von dezentralen Infrastrukturen wie zum Beispiel ärztlicher Versorgung, Geschäften oder Bildungseinrichtungen. Sie kann zu einer größeren Lebensqualität beitragen, wenn Wege

durch weniger motorisierte Fahrzeuge sicherer werden oder wenn mehr aktive Mobilität zur Gesundheit beiträgt. Strategien zur Reduktion des Energieverbrauchs sollten somit nicht nur als Potenzial Teil der Betrachtung in Energie- und Klimaszenarien sein, sondern insbesondere als politisches Handlungsfeld gleichberechtigt neben dem technologischen Umbau durch Konsistenz und Effizienz stehen. Für das Einbeziehen von Suffizienzpolitik in die Strategien zum Erreichen von Klimazielen ist es wichtig, Trägheiten in der Wirkung der Maßnahmen zu betrachten. Einige Suffizienzpolitiken, z.B. Vermeidung von Wegen durch verstärktes Homeoffice, zeigen schon kurzfristig Einsparungen, während andere, wie das beschriebene Beispiel des Stadt- und Regionalumbaus, lange Zeit in der Umsetzung brauchen und zum Erreichen langfristiger Klimaziele beitragen (für eine zeitliche Einordnung der Wirkung verschiedener Maßnahmen siehe Tabellen 6 bis 8). Gleichzeitig darf eine solche aktive Suffizienzpolitik keineswegs als Ersatz für andere Strategien der Systemtransformation verstanden werden. Die ambitionierten Klimaziele erfordern in jedem Fall massive Anstrengungen in allen Dimensionen der Energiewende.

HF 2.3 Verteilungswirkung von Energiewende adressieren

Verschiedene Gerechtigkeitsdimensionen der Energiewende zu berücksichtigen – sowohl in den Strategien als auch in konkreten Maßnahmen – ist ein wichtiger Aspekt in ihrer Umsetzung als gesellschaftliches Gemeinschaftsprojekt. Dies betrifft insbesondere die **gerechte Verteilung von Nutzen und Lasten der Energiewende**. Wohlhabendere Bevölkerungsschichten tragen im Allgemeinen durch deutlich höhere Pro-Kopf-Energieverbräuche überproportional zu den Gesamtemissionen bei (beispielsweise durch größere Wohnflächen, häufigeres Reisen oder höheren Konsum von energie- und emissionsintensiven Produkten). Eine starke CO₂-Bepreisung, verbunden mit einer Rückerstattung in ausreichender Höhe, kann zugleich solch emissionsintensive Lebensstile teurer machen und Energiearmut verhindern.

Eine gerechtere Verteilung von Verbrauch und Kosten könnte auch durch progressive Energietarife angestrebt werden, die einen Grundbedarf günstig und darüber hinausgehende Zusatzbedarfe deutlich teurer bepreisen. Hier bestehen allerdings Herausforderungen in der Umsetzung, insbesondere allgemein bei der Abgrenzung eines solchen Grundbedarfs und bei der Berücksichtigung der unterschiedlichen energetischen Voraussetzungen der Haushalte.

Ein weiteres Beispiel dafür, wie Klimaschutz-Maßnahmen zu gerechter Verteilung beitragen können, ist eine Mobilitätspolitik, die allen den Zugang zu Mobilitätsinfrastrukturen ermöglicht: Durch den aktuell oftmals vorherrschenden Fokus auf den motorisierten Individualverkehr werden Gesellschaftsgruppen mit geringerer Autonutzung tendenziell benachteiligt. Dies gilt zum Beispiel für Kinder, ältere Menschen oder einkommensschwache Bevölkerungsgruppen. Eine Mobilitätspolitik, die sich über grundsätzlichen Zugang zu Mobilität für alle Bevölkerungsgruppen statt über die selektive Förderung bestimmter Verkehrsmittel definiert, kann gleichzeitig Klimaschutz und Verteilungsgerechtigkeit vorantreiben.

Weitere Felder der Energiegerechtigkeit umfassen **Prozess- und anerkennende Gerechtigkeit**. Beide können entscheidend zur Akzeptanz der Energiewende in der Bevölkerung beitragen. Bei Prozessgerechtigkeit geht es darum, dass die Umsetzung der Energiewende in transparenter Weise, nach nachvollziehbaren Regeln und

mit fairem Mitspracherecht aller Betroffener erfolgt. Dies ist etwa bei der Standortverteilung von Infrastrukturen relevant, zum Beispiel bei Windrädern. Anerkennende Gerechtigkeit bezieht sich darauf, dass die Kommunikation zur Transformation so gestaltet ist, dass Entscheidungen erläutert werden, Informationen zugänglich sind und die Bedürfnisse aller gesellschaftlichen Gruppen anerkannt werden – auch die jener Gruppen, für die die Energiewende besondere Belastungen bringen kann.

HF 2.4 Anreize für Bürger*innen setzen, sich aktiv am Umbau der Energieversorgung zu beteiligen

Die Dezentralisierung des Energiesystems ermöglicht Bürger*innen, die Transformation des Energiesystems aktiv mitzugestalten. Sie können beispielsweise mit einer Photovoltaikanlage im eigenen Haushalt Strom erzeugen und durch Batteriespeicher oder flexibles Laden von Elektrofahrzeugen die fluktuierende Einspeisung ausgleichen. Um dieses Potenzial nutzen, sollten rechtlich-ökonomische Rahmenbedingungen Anreize für systemdienliche Investitionsentscheidungen schaffen und die Akteure zu einem systemdienlichen Betrieb ihrer Anlagen motiviert werden. Ein Beispiel: Bei PV-Aufdachanlagen sollte das Ziel sein, Anreize für eine möglichst vollständige Belegung der sinnvoll nutzbaren Dachfläche mit PV-Modulen zu setzen anstatt für eine teilweise Belegung, die auf die Deckung des Eigenbedarfs optimiert ist.

Die Akteursvielfalt, die durch die Dezentralisierung der Energieversorgung ermöglicht wird, wird als wichtige Bedingung für die Akzeptanz der Energiewende gesehen. Neben Prosumern spielen hier auch Energiegenossenschaften und andere Formen der Bürgerenergiegesellschaften eine wichtige Rolle. Nichtsdestotrotz kann die Bereitstellung der erforderlichen Energiemengen und deren Transport nicht alleine durch dezentrale, kleine Anlagen gelingen. Ein Ausbau großer Erzeugungsparks wie Windenergie auf See und PV-Freiflächenanlagen sowie ein Ausbau der Übertragungsnetze sind ebenfalls unverzichtbar.³⁹

Handlungsfeld 3:

„Getting the Price Right“ für Klimaneutralität

Um Klimaneutralität zu erreichen, müssen fossile Energien aktiv aus dem Energiesystem gedrängt werden. Hierbei kommt Preissignalen eine wichtige Rolle zu, die ausreichend stark zugunsten CO₂-armer und CO₂-freier Energieträger ausgestaltet werden müssen. Dazu können bestehende Maßnahmen weiterentwickelt und zusätzliche Maßnahmen eingeführt werden.

HF 3.1 CO₂-Bepreisung in allen Sektoren wirksam ausgestalten

Die notwendigen Investitionen für den Übergang zur Klimaneutralität müssen zum größten Teil von privaten Akteuren finanziert werden. Damit dies geschieht, müssen sie auch wirtschaftlich attraktiv sein. **Ein angemessener CO₂-Preis ist hierfür ein wichtiges Element und sollte das hauptsächliche Steuerinstrument sein.**⁴⁰ Er allein ist allerdings für das Erreichen der Klimaschutzziele nicht ausreichend, da er in einigen Bereichen seine Wirkung nicht entfalten kann. Mögliche Gründe dafür sind

³⁹ Die Rolle von zentralen und dezentralen Anlagen und Akteuren im Energiesystem wird detailliert in acatech/Leopoldina/Akademienunion 2020-2 diskutiert.

⁴⁰ Siehe auch acatech/Leopoldina/Akademienunion 2020-1; acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1 Kap. 3.

Informationsdefizite und -asymmetrien, Differenzen zwischen langfristigem volkswirtschaftlichen Nutzen und kurzfristigen Amortisationserwartungen von Unternehmen und Haushalten sowie durch nicht ausreichende Anreize für private Akteure, in Infrastrukturen, Forschung und Entwicklung zu investieren.⁴¹ Eine **Kombination mit weiteren, sektorspezifisch differenzierten Maßnahmen** ist erforderlich. Dies beinhaltet zuvorderst den Abbau der immer noch bestehenden Subventionen fossiler Energieträger.⁴² Darüber hinaus nötig sind ordnungsrechtliche und Fördermaßnahmen, die Weiterentwicklung von Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie Instrumente zur Sicherung der Finanzierbarkeit von Investitionen.

In Deutschland unterliegen bereits viele Energieverbrauchssektoren einer CO₂-Bepreisung. Die energieintensive Industrie und die Energiewirtschaft sind in den europäischen Emissionshandel (EU-ETS) einbezogen. Brenn- und Kraftstoffe fallen unter das nationale Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG). Als Teil des „Fit-for-55“-Paketes wird für den Zeitraum ab 2025 auch auf EU-Ebene ein Emissionshandelssystem für den Wärme- und Verkehrssektor geplant. Es ist ein ausreichend hohes Niveau der CO₂-Bepreisung nötig, damit diese ihre Lenkungswirkung entfalten und tatsächlich Investitionen in CO₂-ärmere Technologien anreizen kann. Dies war in der Vergangenheit jedoch oft nicht gegeben.

Bei der Ausgestaltung von CO₂-Preisen besteht die Herausforderung, dass einerseits ein einheitliches System wünschenswert ist, da es einen effizienten Ausbau der jeweils günstigsten Vermeidungsoption anreizt. Andererseits ist es sinnvoll, zumindest kurz- bis mittelfristig sektorspezifisch differenzierte Preissysteme zu etablieren, um trotz unterschiedlicher Preissensitivitäten die Transformation in allen Bereichen rechtzeitig einzuleiten und Verteilungswirkungen berücksichtigen zu können. Im Industriesektor ist zum Beispiel die internationale Wettbewerbsfähigkeit von großer Bedeutung und darf nicht aus dem Blick geraten.

Im Gebäude- und Verkehrssektor ist die Verteilungswirkung der CO₂-Bepreisung ein wichtiger Faktor, der sich auch positiv auf die Akzeptanz geplanter und getroffener Maßnahmen auswirken kann. So können zum Beispiel gut ausgestaltete Rückerstattungen der Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung einen sozialen Ausgleich schaffen.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass es im Sinne des Bestandsschutzes und der Planbarkeit wünschenswert ist, dass der CO₂-Preis moderat beginnt und dann planbar ansteigt. Jedoch sind CO₂-arme Technologien in der Regel gerade zu Beginn der Transformation deutlich teurer und werden dann mit zunehmender Verbreitung günstiger. Um Lerneffekte bei diesen Technologien zu erzielen, kann eine zusätzliche Förderung sinnvoll sein. Auch Mindestpreise und Preiskorridore können helfen, Investitionssicherheit zu schaffen.

41 acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1, S. 55 f.

42 Zu den bestehenden Subventionen in Deutschland gehören beispielsweise Begünstigungen für die Braunkohlewirtschaft, kostenlose Zuteilungen von CO₂-Emissionszertifikaten, Energiesteuerbefreiungen für Dieselmotoren und Kerosin sowie für eine Reihe von Energienutzungen. Das Umweltbundesamt stellt diese als Teil umweltschädlicher Subventionen in Deutschland regelmäßig zusammen, siehe UBA 2021.

HF 3.2 Abgaben, Umlagen und Steuern reformieren

Aktuell ist Strom im Verhältnis zu fossilen Brennstoffen wie Erdgas und Öl im Wärmebereich stärker mit Steuern, Abgaben und Umlagen belastet, allerdings führt die steigende CO₂-Bepreisung im Rahmen des Brennstoffemissionshandelsgesetzes zu einer zunehmenden Angleichung. Im Verkehrsbereich liegt die Belastung auf Diesel und Benzin dagegen über der Belastung von Strom. Unterschiede in der Abgabenbelastung wirken sich auf die relativen Preise der Energieträger untereinander und damit auch auf Verbrauchsentscheidungen aus. Dieser Hebel muss daher in eine Richtung genutzt werden, die den Transformationspfad unterstützt. Das heißt konkret:

- Eine schnelle Diffusion von Technologien zur direkten und indirekten Elektrifizierung, insbesondere durch Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge und Elektrolyseure, sollte durch im Vergleich möglichst geringe Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom begünstigt werden.
- Ein schneller Hochlauf der erneuerbaren Stromerzeugung erfordert auch Anreize zur Flexibilisierung der Stromnachfrage – zum Beispiel bei der Elektromobilität und Wärmeerzeugung. Zeitlich variable Strompreise können einen wirksamen Anreiz für die systemdienliche Nachfrageflexibilisierung bieten.
- Anreize zur Minimierung des Energiebedarfs sind auch und gerade in einem klimaneutralen Energiesystem wichtig, da Flächen und Ressourcen für die Energiebereitstellung begrenzt sind.

Diese Anforderungen können mit einer Umstellung der Abgaben und Umlagen erfüllt werden. Kurzfristig ist hierfür gegebenenfalls eine weitere **Senkung der Abgaben, Umlagen und Steuern auf Strom** notwendig, um Sektorenkopplungstechnologien finanziell attraktiver zu machen. Die Stromsteuer könnte dazu beispielsweise auf ein Mindestmaß abgesenkt und andere Energiesteuern entsprechend erhöht werden. Langfristig kann eine Besteuerung, die sich am Energiegehalt des Energieträgers (also nicht allein an den CO₂-Emissionen) bemisst, bei sinkendem CO₂-Ausstoß dazu beitragen, dass negative Effekte auf die Energieeffizienz eingeschränkt werden und zudem das Finanzvolumen für den Staat nicht zu stark absinkt.

HF 3.3 Mit nicht marktlichen Maßnahmen den Ausstieg aus den fossilen Energien beschleunigen

Kaufentscheidungen werden häufig nicht ausschließlich aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen getroffen. So spielen beispielsweise bei der Auswahl eines neuen Heizsystems auch die bisherigen Erfahrungen und Empfehlungen der verfügbaren Installateure eine starke Rolle. Beim Kauf eines neuen Autos sind Faktoren wie gefühlte Autonomie, Prestige, Sicherheit(sgefühl) oder Fahrspaß wichtige Auswahlkriterien. Zudem sind bei Kaufentscheidungen auch die Verfügbarkeiten ausschlaggebend: Wenn beispielsweise eine deutlich größere Auswahl an KfZ-Modellen mit Verbrennungsmotor vorhanden ist oder der lokale Installateur nur Gaskessel anbietet, werden Kunden diese Optionen häufiger auswählen. Auch könnten zukünftige Betriebskosten falsch eingeschätzt werden und so beispielsweise Ölheizungen weiter betrieben oder neu installiert werden, wenn Menschen keine Verteuerung des Heizöls erwarten. Zudem sind teilweise auch Energieberater unzureichend geschult oder nicht verfügbar.

Um Neuinstallationen in fossile Technologien zu vermeiden, können daher weitere Maßnahmen neben der Verteuerung sinnvoll sein. Beispiele hierfür sind eine **Ausbildungsoffensive** für (Energie-)Beraterinnen und Berater, verschärfte Flottengrenzwerte für Kraftfahrzeuge, **Zufahrtsbeschränkungen** für konventionelle Fahrzeuge oder auch für sehr große Fahrzeuge in ausgewählte Gebiete (zum Beispiel Innenstädte) oder **Ausstiegsdaten für bestimmte Technologien** wie zum Beispiel Verbrennungsmotoren oder fossile Heizungen.

Handlungsfeld 4:

Wichtige Netzinfrastrukturen rechtzeitig ausbauen

Zu den zentralen Infrastrukturen der Transformation hin zur Klimaneutralität gehören neben den Stromerzeugungskapazitäten aus erneuerbaren Energien verschiedene Netzinfrastrukturen. Diese haben sehr lange Lebensdauern und auch lange Planungszeiträume. Daher müssen sie vorausschauend und europäisch koordiniert ausgebaut werden.

HF 4.1 Infrastrukturen integriert planen mit einem Systementwicklungsplan

Die zunehmende Sektorenkopplung erfordert eine **stärkere Verzahnung des Aus- und Umbaus der Strom- und Wasserstoffnetze sowie die Umnutzung von Erdgasnetzen für Wasserstoff**. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, wird schon seit einiger Zeit die Einführung eines strukturierten Prozesses zur Erarbeitung einer Systementwicklungsstrategie diskutiert, die der Erstellung der Netzentwicklungspläne vorgeschaltet werden soll. Das Ziel eines Systementwicklungsplans wird dabei unterschiedlich formuliert. Zunächst wurde vor allem eine bessere Verzahnung der Netzentwicklungspläne und der jeweiligen Szenariorahmen diskutiert. In einer weiter gefassten Zielstellung adressiert und strukturiert eine Systementwicklungsstrategie aber auch andere Abstimmungsprozesse der Energiewende.

Der Treiber für eine umfassendere Systementwicklungsstrategie ist die Feststellung, dass Planungssicherheit für Energieinfrastrukturen als natürliche Monopole mit langen technischen Lebensdauern von besonderem öffentlichem Interesse ist. Werden heute beispielweise Stromnetze erneuert, können teure Grabungsarbeiten in der Zukunft vermieden werden, wenn diese bereits jetzt auf die möglichen Anforderungen durch den Ausbau von Wärmepumpen und Elektromobilität ausgelegt werden. Der regulatorische Rahmen ist bisher sehr stark auf die Vermeidung von Fehlinvestitionen ausgelegt und engt somit Handlungsspielräume ein. Im Angesicht der großen Transformation ist aber ein Vorgehen erforderlich, das den Unsicherheiten der Zukunft Rechnung trägt. Eine Systementwicklungsstrategie sollte daher in einem politischen Prozess klären, auf welche Anforderungen Infrastrukturen in der Zukunft ausgelegt werden sollen. Dies beinhaltet auch Entscheidungen darüber, gegen welche Risiken vorgesorgt werden soll. Dies würde es Infrastrukturbetreibern in bestimmten, in der Systementwicklungsstrategie festgelegten Bereichen ermöglichen, zu investieren, obwohl die Investitionen nicht in allen denkbaren Entwicklungen in der Zukunft optimal sind. Die Systementwicklungsstrategie hätte darüber hinaus Signalwirkung auch für Akteur*innen in anderen Bereichen der Energiewende und würde die Planbarkeit erhöhen.

HF 4.2 Stilllegung von Gasverteilernetzen planen und sozial abfedern

Das Voranschreiten der Sektorenkopplung führt dazu, dass in einem klimaneutralen Energiesystem die Bedeutung der dezentralen Gasversorgung deutlich zurückgeht.⁴³ Dies wird auch dazu führen, dass ein bedeutender Anteil der Gasverteilernetze in Zukunft nicht mehr benötigt wird. Für diese Netze müssen Pläne für eine schrittweise Stilllegung entwickelt werden, die dem schrittweisen Umbau der Wärmeversorgung in den einzelnen Wohngebieten Rechnung tragen. Dies beinhaltet unter anderem auch eine Abfederung von möglichen hohen Kosten bei den letzten Netznutzern.

HF 4.3 Europäische Integration der Netzinfrastrukturen vorantreiben

Auch auf europäischer Ebene ist eine intensive Kooperation in Bezug auf die Infrastrukturen notwendig. Stromseitig werden große Interkonnektorkapazitäten benötigt, um regionale Ausgleichseffekte bei der Einspeisung der dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien und beim Austausch von Flexibilität zu ermöglichen. Dies kann den Zugang zu kostengünstigen Potenzialen für den Ausbau der erneuerbaren Energien und für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen sicherstellen. Vor allem beim Ausbau der Netze zur Anbindung der Windenergie auf See, insbesondere in Nord- und Ostsee, ist eine sehr enge Koordination und Zusammenarbeit sinnvoll, um den Ausbau effizient zu gestalten.

Auch bei den weiteren Infrastrukturen sind eine europäische Koordination und Kooperation notwendig – dies gilt insbesondere für Wasserstoff- und CO₂-Netze und -Speicher, aber auch im Verkehrssektor. Nur so ist sicherzustellen, dass potenzielle Exportländer Zugang zur Wasserstoffnachfrage beziehungsweise Zugang zu möglichen CO₂-Speichern und Nutzern haben, und dass eine kostenminimale Transformation des europäischen Energiesystems gelingt. Idealerweise sollte auch auf europäischer Ebene die Planung der unterschiedlichen Infrastrukturen integriert erfolgen.

Handlungsfeld 5:

Transparente und verlässliche Leitplanken für den Einsatz von Elektrifizierung, Wasserstoff, PtX und Biomasse setzen

Für viele Anwendungen können verschiedene klimaneutrale Energieträger wie erneuerbarer Strom, grüner Wasserstoff und dessen Derivate sowie Biomasse alternativ eingesetzt werden. Die **Konkurrenz dieser Energieträger führt jedoch zu Investitionsunsicherheiten** bei den entsprechenden Technologien und stellt damit ein Hemmnis für deren Markthochlauf dar. Trotz der noch bestehenden Unsicherheiten in einigen Anwendungsbereichen gibt es bereits einen Konsens über No-Regret-Optionen für den Einsatz von Wasserstoff sowie marktreife Technologien für die direkte Elektrifizierung in den Anwendungssektoren. Die kommenden Jahre sind entscheidend für die Erreichung der 2030er-Ziele und für die Weichenstellung für den gesamten Pfad hin zu Klimaneutralität 2045: Bereits heute müssen die Leitplanken für den Einsatz

⁴³ Erdgas wird im klimaneutralen Energiesystem nicht mehr genutzt. Ob ein Teil der dezentralen Erdgasversorgung durch dezentrale Wasserstoffversorgung substituiert werden sollte, wird in den Studien kontrovers gesehen. Klar ist jedoch, dass der Wasserstoffanteil im Vergleich zu den direktelektrischen Alternativen und Wärmenetzen in jedem Fall gering sein wird.

von Wasserstoff und direkte Elektrifizierung in den jeweiligen No-Regret-Bereichen gesetzt und der Einsatz der begrenzt verfügbaren Biomasse priorisiert werden.

HF 5.1 Marktdiffusion von direktelektrifizierten Technologien fördern

Direktelektrische Technologien wie batterieelektrische Fahrzeuge und Wärmepumpen zeichnen sich durch geringe Umwandlungsverluste aus. Sie sollten daher in allen Bereichen, in denen sie wirtschaftlich verfügbar sind, priorisiert eingesetzt werden. Die Metaanalyse der Energiesystemstudien sowie die eigenen Berechnungen auf Basis des REMod-Modells zeigen deutlich, dass eine schnelle Marktdiffusion dieser Technologien für die effiziente Erreichung der 2030er-Ziele elementar ist, selbst unter der Annahme einer signifikanten Reduktion der Endenergienachfrage.

Um die Marktdiffusion der direktelektrischen Anwendungen zu fördern, sind zum einen die Reformen bei den Umlagen und Abgaben auf Strom weiterzuführen (siehe Handlungsfeld 3.2), damit Strom als der wichtigste Energieträger des zukünftigen Energiesystems im Vergleich zu anderen Energieträgern möglichst günstig wird. Zu anderen braucht es eine Reihe von sektor- und anwendungsspezifischen Maßnahmen, um die Direktelektrifizierung zu fördern (siehe Handlungsfelder Wärme, Verkehr und Industrie).

Die Förderung der Direktelektrifizierung sollte gleichzeitig die Möglichkeiten der Lastflexibilisierung mitdenken und Rahmenbedingungen so ausgestalten, dass Anreize für flexible Stromnutzung bestehen. Insbesondere in Verbindung mit thermischen Speichern (bei Heizungen und auch Prozesswärme) sowie elektrischen Speichern (zum Beispiel Batterien in Elektrofahrzeugen) können so große Flexibilitätspotenziale nutzbar gemacht werden.

HF 5.2 Einsatz von Biomasse analysieren und priorisieren

Biomasse ist eine erneuerbare Ressource, die sowohl im Energiesektor als auch als Rohstoff beziehungsweise Baustoff vielfältig einsetzbar ist. Gleichzeitig ist der Anbau von Biomasse für energetische Zwecke flächenintensiv, kann Böden, Gewässern und der Artenvielfalt schaden und steht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion.⁴⁴ Biomasse wird daher von (fast) allen Szenarienstudien als begrenzte Ressource angesehen, deren Potenziale bereits heute größtenteils erschlossen sind. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit einer umfassenden Biomassestrategie. Diese kann erstens sicherstellen, dass nur **nachhaltig erzeugte Biomasse** energetisch genutzt wird und zweitens dafür sorgen, dass Biomasse so eingesetzt wird, dass sie den **größtmöglichen Nutzen für das Gesamtsystem** bringt.

Als Grundlage einer Bioenergiestrategie müssen Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse definiert werden. Der Fokus sollte darauf liegen, **ungenutzte Potenziale von Rest- und Abfallstoffen** zu nutzen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Eigenschaften von Rest- und Abfallstoffen für die energetische Nutzung häufig ungünstiger sind als diejenigen der heute genutzten öl- und stärkehaltigen Energiepflanzen. Insbesondere für die Herstellung von Biokraftstoffen aus Rest- und Abfallstoffen sind spezielle Verfahren erforderlich, die sich noch in der Entwicklung befinden.⁴⁵ Der Anbau

⁴⁴ acatech/Leopoldina/Akademienunion 2019.

⁴⁵ Ebd.

von Biomasse für energetische Zwecke findet oft unter umweltschädigenden Bedingungen statt und kann die Flächenknappheit verschärfen. Er ist daher nur in sehr begrenztem Maß sinnvoll, vor allem um in Kombination mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung netto-negative Emissionen zu erzeugen (BECCS). Die Bereitstellung von Bioenergieträgern sollte stets im Vergleich mit alternativen Lösungen zur Bereitstellung erneuerbarer Energieträger bewertet werden, welche ökologische Vorteile gegenüber dem Anbau von Energiepflanzen haben könnten – zum Beispiel einer Kopplung von Moorigwiedervernässung⁴⁶ und Photovoltaiknutzung. Diese Opportunitäten und Flächennutzungsalternativen müssen sorgsam abgewogen werden, um schließlich der Lösung Vorrang zu geben, die in der Gesamtschau der Umweltauswirkungen am besten abschneidet.

Bei der systemdienlichen Nutzung von Biomasse zeichnen bestehende Szenariestudien noch kein eindeutiges Bild. Einige Studien sehen Vorteile des Biomasseeinsatzes in der **Industrie**, da dort später eine Umrüstung auf BECCS erfolgen kann. Andere Studien sehen hingegen eher Vorteile im Einsatz von Biokraftstoffen im **Schiffs- und Luftverkehr** sowie zum Teil im Schwerlastverkehr. Konsens besteht jedoch darin, dass die heutige EEG-geförderte Nutzung in Biogasanlagen zur bedarfsunabhängigen Stromerzeugung im Gesamtsystemkontext nicht sinnvoll ist. Auch der Einsatz von Biomasse für die Niedertemperaturwärme, wie er im Moment vor allem im Gebäudesektor üblich ist, sollte in Zukunft nur noch in Sonderfällen erfolgen. Als **Rohstoff** jedoch kann Biomasse im Gebäudesektor eine hohe Wirkung entfalten, beispielsweise als Baustoff, der emissionsintensive Baustoffe ersetzt. Eine Biomassestrategie muss daher die rohstoffliche Nutzung sowie die **Kaskadennutzung** (erst rohstofflich, dann energetisch) integriert mitdenken.

In Konsequenz aus den Szenariestudien muss in den nächsten Jahren eine Verschiebung des Bioenergieeinsatzes weg vom Energiesektor hin zunächst (je nach Art der Biomasse) zur rohstofflichen Nutzung und dann zur Industrie und in Teilen zum Verkehrssektor erfolgen. Dies wird nicht zwangsläufig allein der Markt regeln können. Gestützt auf eine umfassende Analyse zum systemdienlichen Biomasseeinsatz auch unter Einbeziehung der Konkurrenzsituation zu Wasserstoff und SynFuels sollte eine Bioenergiestrategie klare Vorgaben für eine **Priorisierung** machen, zum Beispiel über Mindest- aber auch Maximalquoten für bestimmte Einsatzzwecke. In die Analyse einbezogen werden sollte auch die Strategie zur Erzielung negativer Emissionen (siehe Kapitel 7), da diese einen starken Einfluss auf die Notwendigkeit und den Umfang des Einsatzes von BECCS hat. Für die Erzeugung von Biokraftstoffen aus Rest- und Abfallstoffen besteht noch ein erhöhter Forschungsbedarf, welcher ebenfalls in der Bioenergiestrategie durch gezielte Forschungsförderung adressiert werden kann.

46 Eine Wiedervernässung von Mooren kann den durch die Trockenlegung verursachten Abbau des Torfkörpers und die damit verbundenen hohen CO₂-Emissionen stoppen. Zusätzliches CO₂ wird allerdings aufgrund des langsamen Wachstums des Torfkörpers auf den für die Klimaziele relevanten Zeitskalen kaum gebunden, sodass kein nennenswerter Beitrag zur Erreichung negativer Emissionen zu erwarten ist. Siehe auch Erlach et al. 2022.

Handlungsfeld 6:

Energiewendekompetenzen bei Fachkräften erweitern und Informationen frei bereitstellen

Damit Menschen klimafreundliche Entscheidungen treffen können, ist eine solide Informationsbasis von großer Bedeutung – beispielsweise beim Ersatz einer bestehenden Heizungsanlage, bei der Überlegung zur Sanierung eines Gebäudes oder bei der Wahl der Mobilitätsform. Insbesondere bei Sanierungen und Heizungssystemen spielen in diesem Zusammenhang auch die Handwerksbetriebe und andere Fachkräfte wie beispielsweise Energieberater*innen eine entscheidende Rolle. Für das Gelingen der Energiewende ist entscheidend, dass den jeweiligen Entscheider*innen zum Zeitpunkt der Investition korrekte Informationen und die Breite der Möglichkeiten zur Verfügung stehen. Dazu können sowohl mehr gut ausgebildete Fachkräfte als auch allgemeine Informationskampagnen beitragen.

HF 6.1 Ausbildung von Fachleuten verbessern und attraktiver machen

Fachkräfte haben einen sehr großen Einfluss auf private Kaufentscheidungen. Viele Installateur*innen, bevorzugen jedoch unabhängig vom Gebäude die Technologien, mit denen sie bereits Erfahrung haben, und beraten auch dahingehend – etwa bei Heizungen. Sogar Beratungsagenturen arbeiten teilweise mit veralteten Informationen. Obwohl die Aus- und Weiterbildung für Energieberater*innen oder Installateur*innen bereits Inhalte zu neuen Heiztechnologien enthält, sind hier weitere Anstrengungen erforderlich. Beispielsweise könnte auf Grundlage der aktuellen Szenarienstudien in der Aus- und Fortbildung stärker vermittelt werden, welche Anforderungen Gebäudehüllen und Heizungssysteme in Zukunft, erfüllen müssen, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Dabei sollten gezielt auch Optionen diskutiert werden, die über die aktuellen gesetzlichen Vorgaben hinausgehen.

Besonders im Bereich der Gebäude werden oft Neubauten mit emissions- und energieintensiven Baustoffen bevorzugt. In Anbetracht knapper Flächen und hoher Energie- und Emissionsintensität von Baustoffen sollte in Zukunft jedoch das Augenmerk auf die **Flexibilisierung und Verdichtung des Bestandes** sowie auf die Nutzung von **alternativen, recycelten und regenerativen Baustoffen** gelegt werden. Hier bestehen sowohl im Bereich der Planung (Architekturbüros, Genehmigungsbehörden) als auch der Ausführung (Handwerk, Technik) erhebliche Wissenslücken aufgrund mangelnder Aus- und Fortbildungsangebote.

Auch im Bereich der Mobilitätswende herrscht ein akuter Fachkräftemangel. Nach jahrzehntelanger Fokussierung auf eine autozentrierte Mobilität sollten nun in der Stadt- und Verkehrsplanung die **Stadt der kurzen Wege** und **aktive Mobilitätsformen** im Vordergrund stehen. Es bedarf Aus- und Weiterbildungen in diesem Bereich, damit die Verwaltungen die neuen Anforderungen an zum Beispiel fahrradfreundliche Mobilität überhaupt umsetzen können. Das bedeutet eine neue Zielsetzung: weg vom freien Verkehrsfluss hin zu mehr Aufenthaltsqualität in der Stadt sowie zu aktiven Mobilitätsformen. Im privatwirtschaftlichen Bereich bedarf es zusätzlich zum technischen Wissen

über Elektromobilität stärkerer Kompetenzen in der **Mobilitätsberatung**, die alle Optionen der Mobilität (vom motorisierten Individualverkehr über öffentlichen Verkehr und Sharing-Modellen bis hin zum Fahrrad) einbezieht.⁴⁷

Zudem sollten **Berufe im handwerklichen und technischen Bereich** allgemein attraktiver gemacht werden, um ausreichend Fachkräfte anzuziehen. Dies gilt sowohl für technische Studiengänge, die laut VDMA besonders stark vom Rückgang der Studierendenzahlen betroffen sind, als auch für Ausbildungsberufe. Hier ist eine Ausbildungs-offensive nötig, da für die im Rahmen der Energiewende benötigten Installationen vielfältiger Technologien ein erheblicher Fachkräftebedarf entsteht.

HF 6.2 Informationskampagnen für interessierte Bürger*innen

Gut verfügbare Informationen sind wichtig, damit Bürger*innen klimafreundlichere Konsumententscheidungen treffen können. Die großen Leitplanken für die notwendige Transformation sollten auf unterschiedlichen Kanälen vermittelt werden. Zudem braucht es zugängliche, detaillierte Informationen, beispielsweise zu den Wärmegestehungskosten unterschiedlicher Heiztechnologien und über Möglichkeiten der energetischen Sanierung. Darüber hinaus bedarf es entsprechender Beratungs- und Informationsangebote, die auch Suffizienzoptionen einbeziehen. Zu nennen sind hier beispielsweise leicht zugängliche Informationen zu Mobilitätsdiensten oder Beratungsstellen für Wohnqualität, die beispielsweise Wohnungstausch vermitteln oder über Umnutzung, Aufstockung, Teilung von Häusern und Zwischennutzung beraten.

HF 6.3 Open Science, Inter- und Transdisziplinarität in der Energiewendeforschung fördern

Die technisch-ökonomische Modellierung von möglichen Energiewendepfaden ist ein wichtiger Beitrag für die Energiepolitik und den gesellschaftlichen Diskurs. Damit die vorgeschlagenen Lösungen den gesamten Möglichkeitsraum abdecken können, sollten sowohl Szenarien- und Modellentwicklungen als auch deren Ergebnisinterpretation partizipativ breit angelegt sein und verschiedene wissenschaftliche Disziplinen einschließen.

Open Science fördert maßgeblich die wissenschaftliche Zusammenarbeit und Partizipation in der Entwicklung und Analyse von Transformationspfaden, das heißt die Offenlegung aller Ergebnisse, Daten und Modelle der zugrunde liegenden Forschung. Die Berücksichtigung von Open-Science-Prinzipien in den Förderbedingungen von Forschungsprojekten ermöglicht insbesondere eine effizientere Nutzung von Forschungsgeldern, da Doppelarbeit vermieden und der offene wissenschaftliche Austausch unterstützt wird.

Ergänzend sollten Forschungsfragen und -ergebnisse über verschiedene Formate der Wissenschaftskommunikation möglichst großen Teilen der Bevölkerung zugänglich gemacht werden. Dabei sind unterschiedliches Vorwissen und unterschiedliche Informationsbedürfnisse verschiedener Bevölkerungsgruppen zu berücksichtigen.

⁴⁷ Das Thema Beschäftigung und Qualifizierung im Mobilitätssektor wurde von der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) detailliert bearbeitet, siehe NPM 2021-1 und NPM 2020-2.

Handlungsfeld 7:

Wirksamkeit von Maßnahmen kontinuierlich überprüfen

Die Vielzahl der Handlungsfelder und der notwendigen Maßnahmen zeigt, welche große Herausforderung Politik und Verwaltung gegenüberstehen, um Klimaneutralität zu erreichen. Nur wenn es gelingt, die Aufgaben auf viele Institutionen und Schultern zu verteilen, kann eine erfolgreiche und zeitnahe Umsetzung gelingen. Aus den Szenariestudien wird klar, dass die **Transformation in allen Sektoren gleichzeitig und mit hoher Geschwindigkeit vorangetrieben werden muss**. Daher benötigen alle Sektoren Instrumente, um die nötigen Maßnahmen steuern und überwachen zu können. Frühindikatoren können dies maßgeblich unterstützen.

HF 7.1 Transformationsziele mithilfe von Frühindikatoren erfassen und im Klimaschutzgesetz verankern

Für wichtige Entwicklungen, für die es eine breite gesellschaftliche und politische Akzeptanz gibt, können Frühindikatoren als eine neue Möglichkeit für die Governance der Wende hin zu Klimaneutralität entwickelt und mit Zielen und Pfaden hinterlegt werden. Frühindikatoren sind hier definiert als Kennzahlen, die wichtige Schritte in Richtung Klimaneutralität bereits anzeigen, bevor tatsächlich Emissionen eingespart werden. Die Indikatoren sind also keine kurzfristigen Ziele ergänzend zu Langfristzielen, sondern vielmehr ein Instrument, um zu überwachen, ob langfristige Ziele erreicht werden.

Solche Frühindikatoren haben in Deutschland und Europa in der Vergangenheit eine wichtige Rolle bei der Koordination von Politikmaßnahmen auf nationaler und europäischer Ebene gespielt. Ähnliche Indikatoren könnten entwickelt und stärker genutzt werden, um wichtige Transformationsziele abzubilden. Beispiele für solche Indikatoren sind der Anteil der Gebäude, die jedes Jahr energetisch saniert werden, die Anteile von Grundstoffen, die klimaneutral produziert und hochwertig recycelt werden, der Anteil der Verkehrsleistung im öffentlichen Personenverkehr oder der Anteil von Elektromobilität am Individualverkehr.

Das Ziel bei der **Auswahl der Indikatoren** ist es, eine angemessene Balance zu finden. Es sollten nicht zu viele Frühindikatoren genutzt werden. Stattdessen sollen die genutzten prägnant sein und einen ausreichenden Bekanntheitsgrad und damit eine politische Relevanz entwickeln. Dies würde dazu führen, dass die verantwortlichen Ministerien der Zielerreichung hohe Priorität beimessen. Andererseits sollten die für die Transformation wichtigen Handlungsfelder erfasst und durch die Frühindikatoren abgebildet werden, sodass keine Fehlanreize entstehen. Mithilfe der Frühindikatoren könnte dies folgendermaßen gelingen:

- Bei der Auswahl der Indikatoren und Formulierung der Ziele ist eine fokussierte Diskussion zu den gemeinsamen Transformationszielen anzuregen. Das ist eine wichtige Grundlage für die Legitimierung und Umsetzung oftmals kontroverser Einzelmaßnahmen.
- Der Grad der Zielerreichung wird durch Frühindikatoren für einzelne Verantwortungsbereiche transparent und kann zur Maßnahmensteuerung verwendet werden.
- Mit der transparenten Messung von Fortschritten und der Diskussion von möglichen Gründen für Abweichungen soll eine faire Grundlage für die „Bewertung“ der Arbeit von Ministerien geschaffen werden.

Dieses Vorgehen kann insgesamt dazu beitragen, dass die wichtigen Handlungsfelder zur Erreichung der Klimaneutralität parallel umgesetzt werden, ohne dass einzelne Institutionen dabei überlastet werden. Es schafft darüber hinaus eine klare Grundlage, auf deren Basis einzelne Indikatoren und Ziele entsprechend gesellschaftlichen Prioritäten, technologischen Fortschritten und geopolitischen Entwicklungen weiterentwickelt werden können. Dies könnte zum Beispiel im Rahmen eines Klimaschutzkabinetts oder eines ähnlichen Gremiums geschehen. Auch der Expertenrat für Klimafragen sieht Frühindikatoren beziehungsweise „Ex-ante-Indikatoren“ als sinnvolles Instrument zum Monitoring der Energiewende an und verweist auf ähnliche, bereits umgesetzte Konzepte in Frankreich, Schweden, den Niederlanden und dem Vereinigten Königreich.⁴⁸

HF 7.2 Bestehende Indikatoren weiterentwickeln, neue Frühindikatoren etablieren

Ein Monitoring von Indikatoren findet für Deutschland bereits im Rahmen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie⁴⁹ und auf EU-Ebene (EU-SDG-Indikatorenset⁵⁰) statt. Die Indikatoren sollen in beiden Fällen die Umsetzung der Sustainable Development Goals messen und eignen sich nur teilweise als Frühindikatoren für die Erreichung der in dieser Stellungnahme vorgeschlagenen Handlungsfelder. Zusätzlich werden die Fortschritte in der Energiepolitik in jährlichen Monitoringberichten des BMWK anhand verschiedener Indikatoren rückwirkend gemessen (zum Beispiel im Jahr 2021 für die Jahre 2018-19). Tabelle 11 nennt am Beispiel des **Sektors Industrie** bereits vorhandene Indikatoren aus der DNS, den EU-SDG-Indikatoren und dem Monitoringbericht des BMWK (vormals BMWi)⁵¹, die jeweils auch für die oben genannten Handlungsfelder passen. Außerdem werden beispielhaft zusätzliche Frühindikatoren vorgeschlagen, die stattdessen oder ergänzend genutzt werden könnten. Bei der genauen Ausgestaltung der Indikatoren ist ein wichtiges Kriterium, ob eine ausreichende Datenbasis zur Berechnung der Indikatoren vorliegt. Neben Bestandsindikatoren können auch Änderungsraten bei den Indikatoren hilfreich sein.

48 ERK 2022, S. 207 ff.

49 Statistisches Bundesamt 2021.

50 Eurostat 2022.

51 BMWI 2021-2.

Handlungsfeld	Vorhandene Indikatoren (DNS oder EU)	Vorgeschlagene Frühindikatoren
Klimaneutrale Prozesse und Produkte politisch fördern	Marktanteil von Produkten mit staatlichen Umweltzeichen (in Prozent) (Statistisches Bundesamt 2021) Anteil von Strom am Endenergieverbrauch der Industrie (BMW i 2021-1)	Anteil der Produktion aus klimaneutralen industriellen Prozessen an der Gesamtproduktion (in Prozent), jeweils für ausgewählte energieintensive Materialien (Velten 2021).
Effektivität von CO₂-Preisen und Investitionssicherheit erhöhen		Verhältnis der Kosten von kohlenstoffarmen zu konventionellen Verfahren (Velten 2021) Anteil besteuert industrieller CO ₂ -Emissionen (in Prozent), nach Preisintervallen (Velten 2021)
Aufbau einer Kreislaufwirtschaft	Anteil des zurückgewonnenen und in die Wirtschaft zurückgeführten Materials am gesamten Materialverbrauch (Eurostat 2022)	Anteil der wiederverwendeten oder rezyklierten Materialien, aufgeteilt nach Materialgruppen (angelehnt an Velten 2021)
Materialeffizienz und Materialsubstitution	Für inländischen Verbrauch von Produkten und Dienstleistungen gewonnene Rohstoffe (Mineralien, Metallerze, Biomasse, fossile Energieträger) im In- und Ausland (Eurostat 2022)	Nicht erneuerbare Materialien in Produkten im Verhältnis zur Produktlebensdauer für einzelne Produktarten (OECD 2023)
Benötigte Infrastruktur aufbauen	-	Anzahl der Industriestandorte, die Zugang zur Wasserstoffproduktion und zu Speichern haben (angelehnt an Velten 2021) Länge/Transportkapazität des Wasserstoffnetzes/Importkapazitäten (Velten 2021)

Tabelle 12: Mögliche Frühindikatoren für die Erreichung von Klimaschutzmaßnahmen in den verschiedenen Handlungsfeldern im Industriesektor

Auch für die **Sektoren Verkehr und Gebäude** können bestehende Indikatoren als Frühindikatoren für die Handlungsfelder genutzt werden und durch weitere Frühindikatoren ergänzt werden. Im Rahmen des Monitoringberichts des BMWK⁵² werden bereits Indikatoren für die Senkung des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor berücksichtigt. Diese sind unter anderem:

52 BMW i 2021-2.

- Änderung der Gesamtverkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr,
- Anteil der Verkehrsleistung des ÖPNV im Personenverkehr,
- Anteil des Schienengüterverkehrs an der Gesamtgüterverkehrsleistung,
- Bestand an mehrspurigen Elektrofahrzeugen.

Diese Indikatoren eignen sich als Frühindikatoren für die Verbrauchsreduktion im Bereich Mobilität. Weiterhin könnten diese um Indikatoren für den **Infrastrukturausbau im Bereich Mobilität** ergänzt werden, zum Beispiel:

- vorhandene Schienenstrecke pro Kopf oder Schienenkapazität pro Jahr⁵³,
- Radwegstrecke pro Kopf⁵⁴,
- Anzahl an Ladesäulen für Elektroautos⁵⁵.

Für den Gebäudesektor werden im Rahmen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS) die Siedlungsdichte und der absolute Anstieg versiegelter Fläche als Indikatoren für Flächeneffizienz (als Teil des SDG 11) ausgewiesen, wobei Verkehrs- und Siedlungsfläche zusammengefasst werden. Als Frühindikator für die Verbrauchsreduktion im Gebäudebereich durch flexible Nutzung des Bestands und Begrenzung des Neubaus wäre der Indikator „durchschnittliche Pro-Kopf-Wohnfläche“ daher besser geeignet.

Ein möglicher Frühindikator für einen Anstieg der Sanierungen ist die Anzahl sanierter Gebäude⁵⁶, gegebenenfalls zusätzlich aufgeteilt nach tiefgreifender, mittlerer und leichter Renovierung⁵⁷. Veränderungen in den verwendeten Technologien der Wärmeversorgung können anhand des Indikators „Anteil der Gebäude mit Heizsystemen auf Basis erneuerbarer Energien und Strom“ gemessen werden (aufgeteilt nach Wohn- und Nichtwohngebäuden und nach gemieteter oder selbst genutzter Wohnung). Im Monitoringbericht des BMWK wird der Anteil verschiedener Heizsysteme lediglich für Neubauten betrachtet, ein geeigneter Frühindikator sollte jedoch auch Bestandsgebäude einbeziehen. Dafür müssten in regelmäßigen Abständen Daten erhoben werden.

53 angelehnt an DIW 2021.

54 angelehnt an Duwe 2021.

55 Duwe 2021.

56 wie in BMWK 2021-2.

57 Vgl. DIW 2021.

4 Rahmenbedingungen für Verbrauchsreduktion politisch gestalten

Auf der Angebotsseite erfordert das Ziel der Klimaneutralität die Transformation des Energiesystems hin zur Elektrifizierung und ausschließlichen Nutzung erneuerbarer Energieträger (Konsistenz). Gleichzeitig muss der Energieverbrauch auf der Nachfrageseite maßgeblich sinken. Hierzu ist eine **ambitionierte Steigerung der Energieeffizienz** in allen Sektoren notwendig (Effizienz). Es besteht jedoch die Gefahr, dass Effizienzgewinne durch zusätzliche Bedarfe teilweise kompensiert werden, weshalb für das Erreichen der Klimaziele eine **absolute Reduktion der Energienachfrage** (Suffizienzstrategien) angestrebt werden muss. Nachfragereduktion bezieht sich hierbei auf eine Reduktion von Konsum- und Produktionsniveaus, was zu einem verminderten Energie- und Ressourcenverbrauch führt. Lange Lebensdauern sind anzustreben, jedoch kann es sinnvoll sein, Produkte frühzeitig durch andere Produkte auszutauschen, die in der Nutzungsphase ökologisch klar überlegen sind. Beispiele hierfür sind der Austausch von fossilen Heizungen durch Wärmepumpen oder die massive Erhöhung der Wind- und Solarkapazität, aber auch einzelne Konsumprodukte wie Kühlschränke. Das Einbeziehen des Energie- und Ressourcenaufwandes zur Herstellung der Produkte ist hierbei zentral für die Abwägung. Die Bewertung wird dadurch erschwert, dass es derzeit nur eine produktionsbasierte, keine konsumbasierte Emissionsbilanz für Deutschland gibt und daher wenig Augenmerk auf die Emissionen bei Herstellung von Produkten gelegt werden kann.

Unterstützt werden kann die Nachfragereduktion durch ein Umdenken und neue Konzepte vor allem in den Bereichen der Mobilität und des Wohnens, aber auch im Konsum und der Produktion unterstützt werden. Steigende Energiepreise alleine führen zwar je nach Anpassungsfähigkeit der Nachfrage ebenfalls zu einer Verringerung des Energiebedarfs. Allerdings besteht das Risiko, dass dies für einkommensschwache Menschen zu einem Verlust an Lebensqualität führt, wenn sie keinen Zugang zu attraktiven klimafreundlichen Alternativen haben. Es ist daher zu betonen, dass Suffizienzstrategien auf die Ermöglichung klimafreundlichen Verhaltens ohne Verlust an Lebensqualität abzielen sollten, und nicht auf bloßen Verzicht zugunsten des Klimaschutzes. Zudem zeigt sich, dass viele Maßnahmen positive Nebeneffekte aufweisen können, die über die Nachfragereduktion hinaus gehen.⁵⁸ Angesichts der notwendigerweise sehr ambitionierten Ziele im technologischen Umbau der **Energieversorgung reduzieren parallel verfolgte Suffizienz- und Effizienzstrategien somit Pfadrisiken auf dem Weg zur Klimaneutralität.**

Zu beachten ist, dass eine Verminderung des absoluten Energieverbrauchs möglicherweise im Konflikt mit einem dauerhaften Wirtschaftswachstum steht. Dies gilt insbesondere, wenn durch nachhaltigen Konsum die Nachfrage nach Produkten

⁵⁸ Für eine Übersicht siehe Creutzig et al. 2022.

und Gütern nachlässt. Die Auseinandersetzung damit, welche Art von Wachstum wünschenswert und notwendig ist, stellt somit einen wichtigen Bestandteil der Diskussion um Klima- und Umweltschutz sowie sozialer Gerechtigkeit dar.⁵⁹

Suffizienzstrategien zur Reduktion des absoluten Energieverbrauchs stellen einen wichtigen Faktor für Transformationspfade zur Klimaneutralität dar, die auch andere ökologische Indikatoren wie Flächen- und Ressourcenverbräuche adressieren und Pfadrisiken reduzieren können – beispielsweise bezüglich der Verfügbarkeit von Importen emissionsarmer Energieträger.⁶⁰ Gleichzeitig bedürfen Suffizienzstrategien einer aktiven Politik, die auch die damit einhergehenden gesellschaftlichen Prozesse berücksichtigt (siehe Handlungsfeld 2). Darüber hinaus ist zu betonen, dass auch eine aktive Suffizienzpolitik nicht den Handlungsdruck in anderen Dimensionen der Energiewende mindert. Ohne technologischen Umbau und Effizienzsteigerung sind die Klimaziele nicht zu erreichen.

Handlungsfeld 8:

Wissenschaftliche Forschung zur Integration von Verbrauchsreduktionsstrategien stärken

Die Wissenschaft liefert wertvolle Erkenntnisse zu Strategien und Herausforderungen der Umsetzung der Energiewende. Insbesondere in Szenarienstudien, die Transformationspfade hin zu einem klimaneutralen Energiesystem ausarbeiten und analysieren, liegt der Fokus oft auf deren technologischer Umsetzung und den damit zusammenhängenden politischen, wirtschaftlichen und sozialen Implikationen. Dies beinhaltet beispielsweise Aspekte wie den Ausbau und die Systemintegration erneuerbarer Energien, die Steigerung der Energieeffizienz durch Technologie- und Energieträgerwechsel in der Wärmeversorgung oder die Entwicklung und Etablierung neuer Prozesse in der Industrie. Auch wenn Strategien zur Reduktion des Energieverbrauchs durch Verhaltensänderungen und gesamtgesellschaftliche Prozesse bereits vielfach erforscht sind, werden diese in Transformationsstudien noch nicht umfassend integriert. Zwar gibt es, insbesondere auf internationaler Ebene, schon zahlreiche entsprechenden Szenarien;⁶¹ die „großen“ nationalen Studien zur Transformation des Energiesystems berücksichtigen Suffizienz Aspekte bisher jedoch nur am Rande. Die Berücksichtigung solcher Strategien sollte insbesondere in der Politikberatung gefordert und durch begleitende Forschung gefördert werden. Dies ermöglicht es, **Potenziale wie auch Grenzen von Verbrauchsreduktion zu quantifizieren**, Wechselwirkungen mit und Auswirkungen auf die technologische Ausgestaltung der Energiewende zu analysieren und Handlungsoptionen auszuarbeiten. Auch die zugrunde liegenden **Zeitskalen** sind zu untersuchen, da unterschiedliche Maßnahmen unterschiedlich schnell effektiv sein können beziehungsweise langfristige Wirkungen (beispielsweise in der Siedlungspolitik) durch entsprechende Politik frühzeitig adressiert werden müssen. Für wissenschaftliche Erkenntnisse zu Potenzialen von Verbrauchsreduktion bedarf es sowohl **empirischer Untersuchungen** als auch **detaillierter Nachfragemodellierung der Bereiche Verkehr, Gebäude und Industrie**. Die Modellierung findet hier auf der Ebene der

59 Siehe beispielsweise D’Alessandro et al. 2020 oder Vogel et al. 2021. Für eine allgemeinere deutschsprachige Einführung siehe Schmelzer/Vetter 2019.

60 Für eine Diskussion zum Zusammenhang zwischen Endenergieverbrauch und den Importmengen von Energieträgern in Szenarien eines klimaneutralen deutschen Energiesystems siehe Wiese et al. 2022.

61 siehe zum Beispiel Grubler et al. 2018, Costa et al. 2021, Eerma et al. 2022.

Energiedienstleistung statt, sodass nicht nur Endenergiebedarfe, sondern auch Indikatoren wie zum Beispiel Personenkilometer, Wohnfläche, Heiz- und Kühltemperatur, Konsum- und Produktionsniveaus abgebildet werden können. Dies ermöglicht es, die Treiber für den Energieverbrauch zu untersuchen und somit auch die Wirkungen verschiedener Maßnahmen abzuschätzen, die den Bedarf an Energiedienstleistung und somit auch die Endenergienachfrage senken sollen.

Handlungsfeld 9: Mobilität neu denken

Der Umstieg von konventionellen Verbrennungsmotoren zu energieeffizienteren Elektrofahrzeugen sowie Effizienzgewinne durch technologischen Fortschritt leisten einen zentralen Beitrag zur Reduktion des Energieverbrauchs im Verkehrssektor. Jedoch sanken in der Vergangenheit trotz Einsparungen durch technische Effizienzsteigerungen die absoluten Emissionen nicht, da gleichzeitig die Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr stets anstieg (einerseits durch Ausweitung der Verkehrsleistung, andererseits durch größere und schwerere Pkw). Um in diesem Sektor die ambitionierten Klimaziele zu erreichen, sind daher nicht nur Effizienzgewinne notwendig – es muss grundsätzlich Verkehr vermieden und auf weniger emissionsintensive Alternativen verlagert werden. In der Regel ist Mobilität kein Selbstzweck, sondern dient unter anderem dem Zugang zum Arbeitsplatz, zu sozialen Aktivitäten oder zu Einkaufsmöglichkeiten.⁶² Dementsprechend greift eine technologisch gedachte Verkehrswende zu kurz, die lediglich etablierte Mobilitätsformen durch effizientere, emissionsarme Antriebe ersetzt. Vielmehr ist es sinnvoll, Mobilität in ihrer Funktion als Zugang zu Zielen zu denken, was den **engen Zusammenhang zu beispielsweise Stadtplanung oder Siedlungspolitik** betont. Ein neues **Mobilitätsverständnis**, das den Menschen und dessen Bedürfnisse in den Mittelpunkt stellt, kann hierbei nicht nur einen wichtigen Beitrag zu einem verringerten Energieverbrauch leisten. Es ermöglicht auch Co-Benefits neben dem Klimaschutz, wie zum Beispiel weniger Flächenverbrauch oder gesundheitlichen Nutzen durch weniger Verkehrslärm und Verkehrsunfälle. Im Folgenden liegt der Fokus auf einem integrierten Ansatz zur Vermeidung und Verlagerung von Verkehr (Suffizienzstrategien). Technische Lösungsansätze (Effizienz- und Konsistenzstrategien) werden im Handlungsfeld 15 diskutiert.

Die Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf den Verbund aus ÖPV, Rad- und Fußverkehr sowie Sharing-Angeboten muss durch politische Weichenstellungen unterstützt und zum Teil auch erst ermöglicht werden. Das betrifft besonders die Veränderung von Infrastrukturen, die auf den Umweltverbund ausgerichtet werden müssen. Hierbei sind insbesondere die unterschiedlichen Herausforderungen im städtischen und ländlichen Raum sowie die Bedarfe verschiedener Bevölkerungsgruppen (zum Beispiel behinderte/ältere Personen, Familien) und die Wechselwirkung mit städtischer und regionaler Siedlungspolitik zu beachten.

HF 9.1 Stärkung des öffentlichen Personenverkehrs (Stadt und Land)

Die Verlagerung des Verkehrs weg vom motorisierten Individualverkehr erfordert den Ausbau und die Verbesserung des öffentlichen Nah-, Regional- und Fernverkehrs als

62 Vgl. Beckmann et al. 2022.

attraktive Alternative. Dies betrifft insbesondere eine **höhere zeitliche und räumliche Verfügbarkeit** der Angebote. Besonders in ländlichen Gebieten sollten zusätzliche Regionalbus- und Bahnverbindungen auf verkehrsintensiveren Strecken (zum Beispiel typische Pendelstrecken) eingesetzt und Haltestellen errichtet werden. Auf nachfrageschwachen Strecken und zu Randzeiten können **On-Demand- beziehungsweise Ridesharing-Angebote (zum Beispiel Sammeltaxi, Ridepooling) und Sharing-Angebote** (Carsharing, Fahrradverleihsysteme) den klassischen ÖPNV ergänzen. Die verschiedenen Verkehrsmittel können so beispielsweise an sogenannten „Mobilitäts-Hubs“ im Rahmen intermodaler Verkehrsketten verknüpft⁶³ und ihre Nutzung durch den einfachen Zugang zu konventionellen und webbasierten Tickets und Planungstools erleichtert werden. Im Allgemeinen sollten Mobilitätsangebote als Teil der öffentlichen Daseinsvorsorge verstanden und nicht über den motorisierten Individualverkehr privatisiert werden. Bis zur Etablierung neuartiger Systeme sollten diese Alternativen entsprechend durch Zuschüsse gefördert werden, da vor allem außerhalb der städtischen Kerngebiete und -zeiten ein privatwirtschaftlicher Betrieb oftmals nicht rentabel ist. Gleichzeitig können Anreize für den motorisierten Individualverkehr, wie etwa Dienstwagen für Arbeitnehmer*innen, ersetzt werden durch Konzepte wie ein für jegliche Verkehrsmittel verfügbares „Mobilitätsbudget“ für Arbeitnehmer*innen.⁶⁴

HF 9.2 Umverteilung des Verkehrsraums in Städten zugunsten des aktiven Individualverkehrs und des öffentlichen Personennahverkehrs

Im urbanen Raum reduziert die Umverteilung des Straßenraums zugunsten von Rad- und Fußverkehr, öffentlichem Verkehr und Mikromobilität die Attraktivität von Pkw und bewegt Menschen zum Umstieg auf klimafreundliche Verkehrsmittel. Eine solche Umverteilung kann durch die Umnutzung von Parkräumen und Pkw-Fahrspuren zu Fahrradwegen, Grünflächen oder Fahrspuren für den ÖPNV realisiert werden. Verkehrsflächen sollten insgesamt nicht steigen, sondern effizienter genutzt beziehungsweise Verkehr vermieden werden. Die Senkung des Energieverbrauchs geht hier einher mit einer höheren Aufenthaltsqualität, einer Stärkung der Klimafitness von Städten und einer reduzierten Belastung von Lärm und Schadstoffen. Für den aktiven Individualverkehr förderlich sind insbesondere die physische Trennung von Radwegen von Pkw-Fahrspuren, ausreichende Fahrradstellplätze sowie die flächendeckende Ausgestaltung von Radnetzen und Fußwegen. Diesen Ansatz der Stadtplanung wählen bereits einige europäische Städte wie zum Beispiel Barcelona („Superblocks“) und Paris (unter anderem Reduktion von Parkraum). Auch in einigen deutschen Städten wurden bereits Maßnahmen der Verkehrsraum-Umverteilung umgesetzt, welche nach einigen Monaten einen reduzierten Pkw-Verkehr im gesamten Quartier bewirkten.⁶⁵ Finanzielle Anreize wie eine City-Maut, unterstützende Parkraumbewirtschaftung oder ein kostengünstiger ÖPNV sind weitere Optionen, den motorisierten Individualverkehr im städtischen Raum zu reduzieren. Zusätzlich eignen sich digitale Parkleitsysteme und Park- und Ride-Konzepte für den Pendelverkehr in die Städte.⁶⁶ Auch hier ist eine integrierte Sichtweise notwendig: Es gilt nicht nur motorisierten Individualverkehr zu vermeiden, sondern soziale Herausforderungen zu bewältigen und insbesondere Mobilität als Zugang zu den Zielen im städtischen Raum zu gewährleisten.

63 Siehe Lemmer 2019.

64 NPM 2021-2.

65 Beispiele siehe Agora Verkehrswende 2022.

66 Ebd.

Um den Kommunen diesen Infrastrukturbau zu ermöglichen, sollte die **Zielrichtung der Straßenverkehrsordnung** geändert werden. Diese ist in ihrer aktuellen Form auf einen guten Pkw-Verkehrsfluss ausgerichtet und erschwert so den Infrastrukturbau für Kommunen.⁶⁷ Durch politische Maßnahmen auf Bundesebene könnten den Kommunen sowohl Vorgaben zur Fläche für verschiedene Verkehrsmittel gemacht werden als auch Unterstützung zugesichert werden, zum Beispiel bei der Finanzierung, Planung und dem Umgang mit mangelnden Fachkräften.

HF 9.3 Verkehr vermeiden

Die Etablierung eines nachhaltigen Mobilitätsverständnis bedingt eine integrierte Verkehrs- und Siedlungspolitik, die Städte und Regionen der kurzen Wege ermöglicht. Für den ländlichen Raum beinhaltet dies insbesondere die Verdichtung von Versorgungsangeboten für den täglichen Bedarf, teilweise durch gezielte Förderung. Eine Reduktion von Anreizen für lange Wege reduziert darüber hinaus auch die Zersiedelung. Die Digitalisierung und damit verstärkte Möglichkeit zum Homeoffice und Telearbeit können ebenfalls Verkehrswege vermeiden, wobei hier potenzielle Nebeneffekte wie ein erhöhter Bedarf an Wohnfläche oder soziale Aspekte zu berücksichtigen sind (zum Beispiel mangelnde Trennung von Arbeit und Privatem, unbezahlte Überstunden, Ungleichheit hinsichtlich der Möglichkeit zur Telearbeit, eventuell sogar Steigerung der Pendelwege/Zersiedelung). Die Reduktion von Verkehr betrifft jedoch nicht nur Wege zur Arbeit und die Grundversorgung. Auch der Zugang zu Freizeitangeboten und der allgemeine Urlaubsverkehr sollten in den Blick genommen werden.

Für den urbanen Raum kann das Konzept der 15-Minuten-Stadt⁶⁸, welches eine nach kurzen Wegen ausgerichtete Stadtplanung beschreibt, neue Wege aufzeigen: In durchmischten Stadtvierteln wird jeweils ein Minimum an Räumen mit den Funktionen Wohnen, Einkaufen, Arbeit, Betreuung, Bildung, Freizeit bereitgestellt, die für Anwohnerinnen und Anwohner innerhalb von 15 Minuten zu Fuß oder mit dem Fahrrad erreichbar sind. Die Stadt Paris verfolgt bereits dieses Konzept, mit dem Ziel, den Pkw-Verkehr um fünfzig Prozent zu reduzieren und gleichzeitig mehr Aufenthaltsqualität zu schaffen. Konkrete Maßnahmen in Paris umfassen zum Beispiel die Umnutzung von Parkplätzen und Fahrspuren zu Grünflächen, Rad- und Fußwegen, die Mitnutzung von Schulgebäuden und -höfen außerhalb der Unterrichtszeiten für Freizeit-, Sport- und Kulturangebote, die Einführung eines „mobilen Rathauses“ in den Stadtteilen sowie die Zusammenlegung von typischerweise nacheinander besuchten Einrichtungen in der Stadtplanung. Um Autoverkehr in der Stadt aufgrund des Pendelns von außerhalb der Stadtzentren zu vermeiden, werden beispielsweise Park-and-Ride-Konzepte oder ein verknüpftes Regionalbahnangebot geschaffen.

HF 9.4 Güterverkehr verlagern und durch regionale Wirtschaftskreisläufe reduzieren

Die Regionalisierung von Wirtschaftskreisläufen führt im Allgemeinen zu verkürzten Transportstrecken und damit zu einer Reduktion des Güterverkehrs. Hier ist zu prüfen, für welche Gütergruppen eine solche Regionalisierung möglich ist und welche Kosten und potenziellen Co-Benefits damit verbunden sind, etwa eine Stärkung der Versorgungssicherheit. Hier kann die Entwicklung eines Labels für regional oder sogar lokal hergestellte oder reparierte Produkte (inklusive lokal angebaute Lebensmittel) die

⁶⁷ Frehn et al. 2022.

⁶⁸ Allam et al. 2020.

Sichtbarkeit für Verbraucher*innen verstärken.⁶⁹ Eine geringere Nachfrage nach Produkten führt ebenfalls zu einer Verringerung des Güterverkehrs. Die Verlagerung von Transportwegen von der Straße auf die Schiene, befördert beispielsweise durch finanzielle Anreize, kann den Endenergiebedarf im Güterverkehr reduzieren. Aufgrund des weniger feinmaschigen Schienennetzes ist eine Verknüpfung mit straßengebundenen Verkehrsmitteln für die letzte Meile dennoch weiterhin notwendig.

HF 9.5 Verlagerung des Fernverkehrs auf die Schiene

Die Verlagerung des Fernverkehrs trägt ebenfalls zur Verringerung der Emissionen im Verkehrssektor bei. Maßnahmen wie eine Maut auf Autobahnen können hierbei zu einer Verschiebung von Verkehrswegen vom Pkw hin zum Bahnverkehr führen, wobei zusätzlich ein entsprechender Infrastrukturausbau erforderlich ist. Insbesondere Kurzstreckenflüge sollten weniger attraktiv sein als die Zugstrecke. Dies wird auf der einen Seite durch eine Verbesserung des öffentlichen Fernverkehrs gefördert, auf der anderen Seite aber durch Maßnahmen wie eine Flugticketsteuer oder die adäquate Besteuerung von Flugkerosin. Eine Ausweitung des Angebots und vereinfachte Buchungsmöglichkeiten für grenzüberschreitenden Bahnverkehr und Nachtzüge unterstützen die Verlagerung des Fernverkehrs auf die Schiene.

Handlungsfeld 10:

Wohnqualität, Flächennutzung und Klimaanpassung in den Fokus nehmen

Der Gebäudesektor trägt gegenwärtig mit rund vierzig Prozent zum Endenergieverbrauch bei, davon circa zwei Drittel für Wohngebäude und ein Drittel für Nichtwohngebäude. Systemisch ist die zentrale Herausforderung die Dekarbonisierung der Wärmebereitstellung, die heute zu rund achtzig Prozent auf fossilen Energieträgern beruht. Die Anzahl an Wärmepumpen deutlich zu erhöhen, ist hierfür zentral. Darüber hinaus können Wärmenetze und gegebenenfalls der Einsatz von klimaneutralen Energieträgern eine wichtige Rolle spielen. Für die Klimaneutralität des Gebäudesektors stellen neben der genannten Beheizungsstruktur die Sanierungsrate und -tiefe die wesentlichen Hebel dar. Im Bereich der privaten Haushalte wird der Energieverbrauch maßgeblich durch die Pro-Kopf-Wohnfläche bestimmt, die durch politische Rahmensetzungen jedoch deutlich schwieriger (und langfristiger) zu beeinflussen ist. Die Auswirkungen der Energiewende auf das Wohnen beinhalten auch potenzielle finanzielle Folgen für die Bewohner*innen, Aspekte der Lebensqualität sowie des Ressourcen- und Flächenverbrauchs oder die Anpassung an den Klimawandel. Daher sollte die Transformation des Gebäudesektors in einem breiteren Kontext gesehen werden und Aspekte der sozialen Gerechtigkeit, der Resilienz sowie des Flächen- und Ressourcenverbrauchs dringend in die Überlegungen einfließen. Dies beinhaltet auch die Berücksichtigungen „grauer“ Emissionen, die im gesamten Lebenszyklus der eingesetzten Baumaterialien anfallen. Da mit steigender Energieeffizienz der Energieverbrauch in der Nutzungsphase sinkt, entfällt ein zunehmender Anteil der Treibhausgasemissionen auf die Herstellung, Instandhaltung und das Lebensende der Gebäudekonstruktion.⁷⁰

69 Diese Maßnahme wird beispielsweise im nationalen Energie- und Klimaplan für Belgien vorgeschlagen (NECP Belgien 2019, S. 127).

70 dena 2021-2.

HF 10.1 Anstieg der Wohnfläche begrenzen und Bestand flexibler nutzen

Die Umkehr des Trends zu höherer Pro-Kopf-Wohnfläche stellt einen zentralen gesellschaftlichen Hebel zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Gebäudesektor dar. Die Wohnfläche pro Einwohner hat sich seit den 1960er Jahren mehr als verdoppelt und liegt aktuell bei rund 47 Quadratmeter. Dies kompensiert teilweise Effizienzgewinne und verstärkt die Neuinanspruchnahme bisher unbebauter Flächen sowie den Wohnraumangel in Städten. In diesem Sinne sollte Wohnqualität und nicht Wohnquantität im Fokus stehen und die optimale Ausnutzung von Wohnfläche angestrebt werden. Dies beinhaltet eine flexiblere Nutzung des Gebäudebestands, die sich nach der jeweiligen Lebenssituation und den Grundbedürfnissen der Menschen richtet.

Mögliche Ansatzpunkte sind die altersgerechte Modernisierung bestehender Wohnungen oder die bauliche Trennung von Ein- und Zweifamilienhäusern⁷¹ sowie Mehrgenerationenprojekte oder auch der generationenübergreifende Tausch von Wohnungen. Anreize für die bauliche Teilung von Häusern könnten seitens der Politik durch finanzielle und planerische Unterstützung in Förderprogrammen gesetzt werden.⁷² Trends zu gemeinschaftlichen Wohnprojekten, Gemeinschaftsflächen (zum Beispiel Gästewohnungen im Geschosswohnungsbau, geteilte Außenflächen) oder Co-Working-Spaces können aufgegriffen und durch Beratungs- und Fördermaßnahmen verstärkt werden.⁷³ Generell kann dem Trend zu mehr Pro-Kopf-Wohnfläche entgegengewirkt werden, indem beispielsweise Mehrfamilienhäuser mit Gemeinschaftsräumen und -gärten gefördert werden.

Um den Flächenverbrauch einzugrenzen, sollte auch im ländlichen Raum die **Minimierung des Leerstandes** gegenüber dem Neubau priorisiert werden.⁷⁴ Im urbanen Raum könnte der Abbau von Barrieren zur Umnutzung von Nutz- zu Wohnflächen den Neubaubedarf weiter senken. Auch im Hinblick auf die Ziele bezüglich der Begrenzung von Flächenversiegelung ist einer besseren Verteilung und Nutzung des Bestandes Vorrang vor Neubau zu geben. Hier ist zu untersuchen, welche Rahmenbedingungen und Anreize auf kommunaler Ebene dahingehend wirksam werden können. Angesichts der Trägheit etablierter Prozesse und Gewohnheiten ist zu erwarten, dass die hier genannten Ansätze zur Begrenzung der Wohnfläche und verstärkten Bestandsnutzung nur mittel- bis langfristig in der Breite Wirkung zeigen. Umso wichtiger ist es, dass entsprechende Weichenstellungen zeitnah erfolgen und die Transformation des Gebäudesektors über Effizienzmaßnahmen und Energieträgerwechsel hinaus vorangetrieben wird.

HF 10.2 Klimaanpassung fördern

Hinsichtlich einer Senkung des Energiebedarfs ist eine schnelle und umfassende Anhebung der Energieeffizienz im Gebäudebestand notwendig (siehe Handlungsfeld 14: Wärmeversorgung klimaneutral gestalten). Neben der Steigerung der Energieeffizienz sollte bei der Sanierung wie auch bei der Städteplanung die Klimaanpassung eine wichtige Rolle spielen. In Städten kann der urbane Hitzeinseleffekt die Lebensqualität er-

71 Das Potenzial derartiger Ansätze zeigen Pionierprojekte wie „aus alt mach 2 – und mehr“ in Bodnegg (Baden-Württemberg).

72 Vgl. Kenkmann et al. 2019.

73 Siehe Kenkmann et al. 2019 und Wuppertal-Institut 2021.

74 Insbesondere durch den hohen Mehrbedarf an Rohstoffen für den Neubau ist die (energetische) Sanierung von Bestandsgebäuden oft ökologisch vorteilhaft gegenüber Abriss und Neubau (siehe zum Beispiel Steger et al. 2022).

heblich beeinträchtigen und für vulnerable Bevölkerungsgruppen gesundheitliche Folgen haben. Der Hitzeschutz muss somit bei der Planung und Nutzung von Gebäuden von vornherein mitgedacht werden, auch um den zukünftigen Energiebedarf für Kühlung zu reduzieren. Dies betrifft unter anderem die Fensterflächen und den Sonnenschutz, aber auch allgemein die Bauweise (zum Beispiel Speichermasse durch schwere Innenbauweise) und die Nachtlüftung.⁷⁵ Darüber hinaus befördern Grünflächen und Bäume in den Städten nicht nur die Klimaanpassung, sondern erhöhen auch bereits innerhalb kurzer Zeit die Lebensqualität im urbanen Raum und reduzieren Zersiedelungsanreize. In Anbetracht der Flächenknappheit in Städten bieten vor allem heutige Verkehrsflächen das Potenzial für Grünflächen der Zukunft, die aktive Mobilität fördern und Aufenthaltsqualität verbessern.

Handlungsfeld 11:

Energiebedarfe durch nachhaltige Gestaltung von Konsum und Produktion senken

Im Industriesektor kann der Energiebedarf durch die Umstellung auf effizientere Prozesse im Rahmen des technologischen Fortschritts sowie die Direktelektrifizierung und Recycling gesenkt werden (siehe Kapitel 6). Darüber hinaus trägt die Verlagerung auf klimafreundlichere Produkte und Materialien sowie allgemein die Vermeidung von Konsum zu einer Senkung des Energiebedarfs im Industriesektor bei. Insbesondere für den letztgenannten Aspekt sollte stärker in den Fokus rücken, ein Produkt bei Bedarf nutzen zu können, als es zu besitzen. Hierzu zählt, dass Sharing-Konzepte durch politische Rahmenbedingungen gefördert werden und die Nutzungsdauer von Produkten verlängert wird. Weiterhin sollte der Konsum langlebiger, reparierbarer und klimafreundlich hergestellter Produkte durch entsprechende regulative Rahmenbedingungen und Informationsbereitstellung gefördert werden.

HF 11.1 Konsum klimafreundlicher Produkte politisch fördern

Politische Rahmenbedingungen können die Nachfrage nach Produkten aus alternativen, weniger energie- und ressourcenintensiven, kreislauffähigen und nachwachsenden Materialien erhöhen. Voraussetzung hierfür ist zunächst, dass für Konsument*innen **Transparenz über die Klimawirkung von Produkten** bestehen muss, damit diese als Kriterium bei der Kaufentscheidung berücksichtigt werden kann. Hierfür sollte eine schnell sichtbare, einfache Kennzeichnung auf Produkten verpflichtet werden, die nach festgelegten Regeln bestimmt und kontrolliert wird (siehe Handlungsfeld 18.1: Kennzeichnungspflichten des Produkt-Fußabdrucks auf Basis von Lebenszyklusanalysen). Im Idealfall ist eine Vereinheitlichung auf EU-Ebene anzustreben. Die Entwicklung zu einer Kreislaufwirtschaft kann durch finanzielle Anreize gefördert werden, indem beispielsweise nicht recyclebare Produkte besteuert werden.⁷⁶

Weiterhin kann die Marktdurchdringung klimafreundlicher Produkte beschleunigt werden durch die Schaffung „grüner Leitmärkte“ über **Quoten für emissionsarme Materialien und Endprodukte**. Dies könnte zunächst für die öffentliche Beschaffung eingeführt werden. Hierfür müssten im Vornhinein Kriterien für die Einordnung als klimafreundliches Material und eine passende Höhe der Quoten festgelegt

⁷⁵ Siehe Offermann et al. 2022.

⁷⁶ Vgl. Nationaler Energie- und Klimaplan Irland (Department of Communications, Climate Action & Environment 2020, S. 74).

werden. Um eine schnelle Umsetzung zu ermöglichen, wird in der Literatur vorgeschlagen, sich zunächst auf einzelne Materialien in besonders emissionsreichen Endprodukten zu konzentrieren (z.B. Quote für Stahl aus Direktreduktion mit Wasserstoff in neuen Pkw), und eine schrittweise ansteigende Quote für grüne Materialien festzulegen.⁷⁷ Langfristig ist die Klassifizierung von Materialien aufgrund ihrer THG-Emissionen im gesamten Lebenszyklus wünschenswert. Alternativ könnten direkt für die Produktion bestimmter Materialien Quoten für die klimaneutrale Herstellung festgelegt werden (siehe Handlungsfeld 16.3).

HF 11.2 Langlebigkeit, Reparierbarkeit und Wiederverwendung fordern und fördern

Hersteller sollten dazu verpflichtet werden, eine Information und Garantie über eine bestimmte Produktlebensdauer zu geben und Nutzungs- und Wartungsinformationen bereitzustellen. Die Anforderungen an Zerlegbarkeit von Haushaltselektrogeräten mit handelsüblichen Werkzeugen in der europäischen Ökodesign-Richtlinie sollte auf weitere Produktkategorien erweitert werden. Zusätzlich sollten eine **verpflichtende Kennzeichnung der Reparierbarkeit** von Produkten, eine **verpflichtende Bereitstellung von Ersatzteilen** und **Anleitungen für unabhängige Reparaturbetriebe** festgelegt werden. In Frankreich wurde 2021 ein solcher Reparaturindex gesetzlich eingeführt.⁷⁸ Reparatur könnte für Konsument*innen gegenüber dem Neukauf auch finanziell bessergestellt werden, indem die Mehrwertsteuer für Reparaturleistungen gesenkt wird oder ein Teil der Reparaturkosten durch den Staat übernommen wird.⁷⁹ Zum Beispiel wird der Reparaturbonus des Thüringer Ministeriums für Umwelt, Energie und Naturschutz viel genutzt und könnte auf alle Bundesländer erweitert werden.

Sharing-Konzepte – zum Beispiel für Fahrräder und Autos, Haushaltsgeräte und Kleidung – tragen dazu bei, dass die Auslastung von Produkten erhöht wird, ein Markt für langlebige Produkte entsteht und letztlich weniger Produkte hergestellt werden müssen. Dies gilt insbesondere für Dinge, die nur selten genutzt (zum Beispiel Kleidung für besondere Anlässe, elektrische Werkzeuge) oder aktuell häufig nach Maximalkapazität angeschafft werden (zum Beispiel großes Auto für den Familienurlaub).

Eine klassische Lösung für die Wiederverwendung von Produkten, vor allem von Verpackungen, sind **Mehrwegsysteme**. Ihre Etablierung sollte weiter gefördert werden. In der SARS-CoV-2-Pandemie wurde der Bedarf für solche Lösungen in neuen Bereichen wie der Außer-Haus-Gastronomie besonders offensichtlich. Aber auch in vielen anderen Bereichen gibt es Potenziale, Einweg- durch Mehrwegprodukte zu ersetzen. Bei neuen Mehrwegprodukten werden entsprechende Rücknahme- und Pfandsysteme benötigt, deren Aufbau gefördert werden sollte. Quoten für Mehrweggebinde können einen Weg darstellen, das Ziel der Wiederverwendung auch tatsächlich zu erreichen. Das Beispiel des Pfands auf Getränke-Einweggebinde hat gezeigt, dass ein kontinuierliches Monitoring der Maßnahmen notwendig ist. Denn das Einwegpfand

77 Vgl. dena 2021-1; Ariadne 2021; Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019.

78 Zunächst für die Produktkategorien Smartphones, Laptops, Fernseher, Rasenmäher, Waschmaschinen; seit November 2022 kommen noch Toplader-Waschmaschinen, Geschirrspüler, Staubsauger, Hochdruckreiniger hinzu. Die Produkte sind mit einem Index zwischen 1 und 10 versehen, der die Reparierbarkeit beschreibt und für Verbraucherinnen und Verbraucher beim Neukauf sichtbar ist. Kriterien für die Reparierbarkeit sind unter anderem die Verfügbarkeit von Reparaturinformationen, Ersatzteilen und Werkzeugen, die Zerlegbarkeit und der Preis von Ersatzteilen. Bis 2024 ist geplant, weitere Kriterien in den Index aufzunehmen, sodass er sich zu einem allgemeinen Langlebigkeitsindex weiterentwickelt (www.ecologie.gouv.fr/indice-reparabilite).

79 Circular Economy Initiative Deutschland et al. 2021.

wurde mit dem Ziel eingeführt, den Mehrweganteil bei Getränkeverpackungen zu erhöhen und hat dieses Ziel klar verfehlt, ohne dass entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen wurden. Bei sehr langlebigen Produkten wie beispielsweise Gebäuden können **modulare Konzepte** helfen, es durch Veränderungen und Erweiterungen einfach an geänderte Bedürfnisse und Nutzungsformen anzupassen. Dadurch kann das Produkt weiter genutzt werden, anstatt es abzureißen oder zu verschrotten. Die Forschung und Entwicklung in diesem Feld sollte gefördert werden. Weitere Anreize, derartige Konzepte im Markt zu etablieren, könnten dadurch gegeben werden, dass zum Beispiel schon zum Zeitpunkt einer Baugenehmigung Anforderungen an die Planung des Objekts gestellt werden, die Unsicherheiten im zukünftigen Bedarf und die Möglichkeit einer flexibleren Verwendung adressieren (zum Beispiel durch eine modulare Bauweise, die einen teilweisen Umbau oder Rückbau erleichtert).

5 Modernisierung der Energieversorgung vorantreiben und Innovationen fördern: die Gestaltung des Technologieumbaus

Handlungsfeld 12:

Stromversorgung schnellstmöglich auf hundert Prozent erneuerbare Energien umstellen

Bis spätestens 2040 müssen erneuerbare Energien den gesamten Strombedarf decken, während die Elektrifizierung der Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie den Bedarf erhöht. Aktuell ist vorgesehen, dass bereits bis 2035 das Stromsystem nahezu vollständig dekarbonisiert wird. Um dies zu erreichen, muss zum einen der Ausbau der erneuerbaren Energien stark beschleunigt werden. Zum anderen muss das Stromsystem weiter flexibilisiert werden, um die Integration der Erneuerbaren zu optimieren.

HF 12.1 Ausbau der erneuerbaren Energien vorantreiben

Alle Szenarienstudien zeigen, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor in den nächsten Jahren deutlich beschleunigt werden muss. Obwohl in allen Szenarien erhebliche Fortschritte bei der Energieeffizienz angenommen werden und grüne Energieträger teils in großem Umfang importiert werden, müssen die Kapazitäten an Windenergie- und Photovoltaikanlagen bis 2045 auf das Vier- bis Sechsfache der heutigen Kapazitäten ansteigen. Die aktuellen Ziele der Bundesregierung für 2030 stimmen in etwa mit den oberen Werten der Bandbreite aus den Szenarien überein. Selbst in Szenarien, die hohe Ziele im Bereich der Suffizienz unterstellen, müssen die Ausbauraten erneuerbarer Energien deutlich gesteigert werden und sind substanzielle Importe klimaneutraler Energieträger vonnöten.

Um die angestrebten Ausbaupfade zu erreichen, müssen die **finanziellen Rahmenbedingungen** so gestaltet sein, dass Investitionen in erneuerbare Energie wirtschaftlich attraktiv sind. Langfristig müssen aufgrund der ambitionierten Ziele für den Ausbau auch ungünstigere Standorte genutzt werden. Zudem sind Zeiten hoher Einspeisungen erneuerbarer Energien typischerweise durch niedrigere Strompreise gekennzeichnet. Diese Umstände sollte ein künftiges Strommarktdesign durch entsprechende Anreize für die Sektorenkopplung berücksichtigen. Dennoch kann sich bereits aktuell aufgrund der stark gesunkenen Stromgestehungskosten insbesondere von Windenergie und Photovoltaik ein Teil der Anlagen am regulären Strommarkt refinanzieren. Es ist jedoch zu erwarten, dass **mittelfristig weiterhin eine Förderung der erneuerbaren Energien notwendig bleibt**, damit Projekte im erforderlichen Umfang realisiert werden. Dies kann beispielsweise weiterhin über die Ausschreibungen im EEG erfolgen, wobei die Ausschreibungsmengen an die aktuellen Ausbauziele angepasst werden müssen. Die Förderkosten können hier gesenkt werden, indem das Fördersystem hohe Sicherheiten für die Anlagen bietet und

nur produktive Risiken auf die Anlagenbetreiber überträgt. Für Kleininvestoren werden weitere Investitionsanreize insbesondere über feste Tarife notwendig sein.

Darüber hinaus müssen die **nicht finanziellen Rahmenbedingungen** verbessert werden, um einen schnellen Ausbau von Windenergie und Photovoltaik zu ermöglichen. So muss sichergestellt sein, dass **ausreichend Flächen für Windenergie- und PV-Freiflächenanlagen** bereitgestellt werden. Dies kann durch Flächenziele für Bund und Länder unterstützt werden, die auch in die Regionalplanung einfließen. Eine stärkere Erschließung geeigneter Dachflächen sowie eine Förderung von Agri-PV und Floating-PV kann die Mehrfachnutzung von Flächen unterstützen und so Flächenkonflikte entschärfen.

Planungs- und Genehmigungsverfahren sollten beschleunigt werden. Dazu können unter anderem klare und einheitliche Naturschutzkriterien beitragen. Konsequente Bürgerbeteiligung innerhalb eines transparenten Rahmens kann gestalterisches Potenzial der Bürger*innen aktivieren, die Energiewende als sinnvolles Gemeinschaftsprojekt erfahrbar und nachvollziehbar zu machen. Dies kann auch die Klagewahrscheinlichkeit gegen geplante Projekte reduzieren. Nicht zuletzt kann die finanzielle Teilhabe von Kommunen, Anwohner*innen die Akzeptanz stärken.

Eine ausführliche Darstellung von zwölf Handlungsoptionen für einen schnelleren Ausbau von Windenergie und Photovoltaik wurde durch eine separate Arbeitsgruppe des Projekts ESYS erarbeitet.⁸⁰

HF 12.2 Stromsystem an die Erfordernisse der erneuerbaren Energien anpassen

In der Vergangenheit war das Stromsystem so ausgelegt, dass steuerbare fossile Kraftwerke die Stromnachfrage in jedem Moment gedeckt haben, indem die Stromerzeugung an die temporären Anforderungen angepasst wurde. In Zukunft wird die Stromerzeugung weitgehend aus variablen erneuerbaren Energien, insbesondere Wind und PV, bestehen. Daraus ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Flexibilität des übrigen Stromsystems. Grundsätzlich kommen sowohl die Stromnachfrage als auch Speicher und Stromerzeuger für die Bereitstellung von Flexibilität infrage. Eine besondere Rolle spielt außerdem der **Netzausbau**, auch gemeinsam mit den europäischen Nachbarn. Eine starke europäische Vernetzung bietet den Vorteil, dass die gesamteuropäische Einspeisung erneuerbarer Energien im zeitlichen Verlauf deutlich ausgeglichener ist als die nationale und zudem Flexibilitätsoptionen aus dem Ausland einbezogen werden können (siehe hierzu auch HF 4). Mögliche Anpassungen umfassen beispielsweise die **Digitalisierung** der Stromsysteme⁸¹ sowie Anpassungen am Markt für Ausgleichsenergie. Komplizierte Gesetze wie beispielsweise die atypische Netznutzung sollten überprüft und gegebenenfalls reformiert werden.

Marktsignale sollten so weit wie möglich den flexiblen Betrieb von Sektorkopplungstechnologien wie Wärmenetzen und Elektrolyseuren fördern, um den Kannibalisierungseffekt⁸² der erneuerbaren Energien zu reduzieren. Zudem sollten gegebenenfalls notwendige langfristige **Anpassungen des Strommarktdesigns** analysiert und breit diskutiert werden.

⁸⁰ acatech/Leopoldina/Akademienunion 2022-2.

⁸¹ Die Anforderungen an digitalisierte Energiesysteme vor allem im Hinblick auf die Resilienz der Stromversorgung werden in acatech/Leopoldina/Akademienunion 2021 beschrieben.

⁸² Sensfuß et al. 2008.

Handlungsfeld 13:

Einen schnellen und systemdienlichen Markthochlauf für Wasserstoff und SynFuels ermöglichen

Um die Emissionsziele der Industrie für 2030 zu erreichen und bereits jetzt Investitionen in die Technologieumstellung im Rahmen der anstehenden Investitionszyklen zu ermöglichen, muss der Markthochlauf für Wasserstoff stark beschleunigt werden. Die Engpässe liegen hierbei auf der Angebotsseite. Neben der gezielten Förderung ist es unabdingbar, einen sicheren Rechtsrahmen für die Herstellung von grünem Wasserstoff zu schaffen. Dieser sollte auch dafür sorgen, dass **Standortwahl und Betrieb der Elektrolyse**, zumindest bei großen Anlagen, systemdienlich erfolgen. Neben der heimischen Produktion von grünem Wasserstoff müssen auch Importbeziehungen und -kapazitäten möglichst schnell auf- und ausgebaut werden.⁸³

HF 13.1 Die Förderlücke für den Wasserstoffhochlauf mit aufeinander abgestimmten Instrumenten schließen

Grüner Wasserstoff ist aktuell nicht konkurrenzfähig gegenüber grauem Wasserstoff.⁸⁴ Langfristig ist zudem noch nicht vollständig klar, ob grüner Wasserstoff konkurrenzfähig wird gegenüber blauem Wasserstoff. Auch wenn die gestiegenen Erdgaspreise die Wirtschaftlichkeitslücke mittelfristig verringern, sind die spezifischen Investitionen in die Elektrolyseanlagen noch ein wesentliches Hemmnis für den Markthochlauf.⁸⁵ Erst im Zuge des Markthochlaufes kommen Skaleneffekte zum Tragen, die Prognosen zufolge die Produktionskosten von Elektrolyseanlagen deutlich senken werden.⁸⁶ Bis dahin muss die Förderlücke durch **angebots- und/oder nachfrageseitige Förderung** geschlossen werden.

Damit der in den Szenarien aufgezeigte Wasserstoffbedarf gedeckt und die Klimaziele erreicht werden können, muss der Markthochlauf für grünen Wasserstoff mit einer enormen Geschwindigkeit erfolgen, welche im Bereich der Diffusionsraten der PV-Technologie in den 2000er Jahren liegt oder diese sogar übertrifft.⁸⁷ Um das zu erreichen, reicht eine Förderung von Einzelprojekten nicht aus. Stattdessen muss über die aktuellen Instrumente hinaus ein Förder- und auch ein Genehmigungsrahmen geschaffen werden, der langfristige Perspektiven bietet. Dieser kann angebotsseitige Förderinstrumenten wie zum Beispiel die Senkung der Stromkosten für die Produktion von grünem Wasserstoff durch Umlagen beziehungsweise Abgabenbefreiung (siehe Handlungsfeld 3.2) sowie die Investitionsförderung im Rahmen einer Förderrichtlinie beinhalten.

Im Gegensatz zum Markthochlauf der PV-Technologie, bei dem Infrastruktur und Nachfrage für den produzierten Strom bereits vorhanden waren, müssen Infrastruktur und Nachfrage für Wasserstoff gleichzeitig zum Hochlauf der Produktion mitentwickelt werden. Daher sollten angebotsseitige Förderinstrumente um nachfragesei-

⁸³ Staiß et al. 2022.

⁸⁴ Grüner Wasserstoff bezeichnet Wasserstoff, der mittels Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wird. Grauer und blauer Wasserstoff werden aus Erdgas hergestellt, wobei bei blauem Wasserstoff das dabei entstehende CO₂ abgeschieden und unterirdisch eingelagert wird (CCS).

⁸⁵ Odenweller et al. 2022.

⁸⁶ Hydrogen Council/Mc Kinsey & Company 2021.

⁸⁷ Ariadne 2021-2.

tige Instrumente (siehe Handlungsfeld 13.2) sowie die gezielte Entwicklung der Infrastrukturen (siehe Handlungsfeld 13.3) ergänzt werden. Dabei existieren starke Wechselwirkungen zwischen angebots-, nachfrage- und infrastrukturseitigen Instrumenten, sodass diese genau aufeinander abgestimmt werden sollten. Durch die Abstimmung der Instrumente soll zum einen eine Über- beziehungsweise Unterförderung vermieden werden. Zum anderen ist sie notwendig, um die Lenkungswirkung der Instrumente in Bezug auf die Systemdienlichkeit sicherzustellen.

HF 13.2 Wasserstoffeinsatz im Anwendungsbereich priorisieren

Auch wenn grüner Wasserstoff angebotsseitig gefördert wird (siehe Handlungsfeld 13.1) und zusätzlich die Rahmenbedingungen für den Import von Wasserstoff und SynFuels geschaffen werden (siehe Handlungsfeld 13.4), ist zunächst mit einer begrenzten Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff zu rechnen. Das begrenzte Angebot trifft dabei in den Nachfragesektoren auf eine **unterschiedliche Zahlungsbereitschaft**. Während die Zahlungsbereitschaft im Verkehrssektor tendenziell hoch ist, gibt es hier vor allem im Pkw- und Lkw-Bereich ausgereifte Alternativtechnologien. Demgegenüber steht der Industriesektor mit tendenziell geringeren Zahlungsbereitschaften, aber der Notwendigkeit, Transformationsprozesse möglichst zügig zu starten, für die es aktuell keine oder wenige Alternativen zu grünem Wasserstoff gibt (zum Beispiel Stahl- und Chemieindustrie). Die nachfrageseitige Förderung des Wasserstoff-Markthochlaufes sollte daher eine **Lenkung der Nachfrage** ermöglichen und sich zunächst an den genannten No-Regret-Optionen für Wasserstoff orientieren. Mögliche Instrumente für die Förderung der Nachfrage sind die Investitionskosten-Förderung über das Dekarbonisierungsprogramm und die sogenannten Important Projects of Common European Interest (IPCEI) sowie die Betriebskosten-Förderung über Klimaschutzverträge oder direkte Förderinstrumente wie im Rahmen von H2 Global. Auch im Verkehrssektor gibt es Teilbereiche, für die der Wasserstoff- beziehungsweise SynFuel-Einsatz zu den No-Regret-Optionen zählt. Dies betrifft vor allem den Luft- und Schiffverkehr. Hier können ambitionierte, verlässlich steigende Wasserstoff- beziehungsweise SynFuel-Quoten zur Erhöhung der Nachfrage beitragen (siehe Handlungsfeld 15.4).

HF 13.3 Infrastruktur- und Elektrolyseausbau aufeinander abstimmen

Gerade bei den neu zu entwickelnden Infrastrukturen für Wasserstoff besteht aus Gesamtsystemsicht ein großer Bedarf, diese schnell und möglichst zeitgleich mit dem Markthochlauf der entsprechenden Anwendungs- und Erzeugungstechnologien auszubauen.

Während in der Phase der Pilotprojekte die Standortwahl für den Aufbau großskaliger Elektrolyseure noch eine untergeordnete Rolle spielt, wird diese zukünftig verstärkt in den Fokus rücken. Mit Blick auf das Ziel im Koalitionsvertrag, bis zum Jahr 2030 eine Elektrolysekapazität von zehn Gigawatt in Deutschland zu erreichen, besteht weitgehender Konsens, dass bei diesen Größenordnungen Elektrolysestandorte unter Berücksichtigung möglicher Engpässe im Stromnetz gewählt werden sollten. Im günstigen Fall werden die Elektrolyseure in Küstennähe im Bereich der guten Windenergie- und Kavernenspeicherpotenziale positioniert. Hier können sie kurz- bis mittelfristig eine Diskrepanz zwischen einem schnellem EE-Ausbau und einem langsamen Stromnetzausbau abfedern und den Redispatch-Bedarf reduzieren. Elektrolyseure werden in vielen Szenarienstudien als wichtige Flexibilitätsoption für das zukünftige Stromsystem genannt. Außerdem kann ein Wasserstofftransportnetz, welches den heimisch er-

zeugten beziehungsweise importierten Wasserstoff in die Verbrauchszentren transportiert, das Stromnetz deutlich entlasten und den Zugang zum Weltmarkt für klimaneutrale Brennstoffe ermöglichen.

Ohne ein Wasserstofftransportnetz werden im Industriesektor, wo in den kommenden Jahren große Investitionen in Technologieumstellungen geplant sind, Elektrolyseure in der Nähe der Industriestandorte errichtet werden, soweit dies bei bestehender Flächenverfügbarkeit möglich ist. Gerade an den südlich gelegenen Industriestandorten kann das zu einer stärkeren Belastung der Stromnetze und einem höheren Redispatch-Bedarf führen und infolgedessen unter Umständen sogar zu erhöhten Emissionen, wenn der Redispatch beispielsweise über Kohlekraftwerke erfolgt. Zudem kann es den Windkraftausbau im Norden behindern und dazu führen, dass größere Mengen Windenergie abgeregelt werden müssen. Der Ausbau der Elektrolyseure und der Wasserstoffinfrastruktur muss somit nahezu zeitgleich erfolgen. Dabei ergibt sich für den Aufbau des Wasserstoffnetzes ein sogenanntes Henne-Ei-Problem: Das Wasserstoffnetz ist nicht rentabel ohne eine Vielzahl von Netznutzern, ohne ein Wasserstoffnetz sind viele stromnetzdienliche Elektrolyse-Standorte von vorneherein unattraktiv. Um dieses Problem aufzulösen, muss die in der **Anfangsphase beträchtliche Finanzierungslücke bei den Wasserstoff-Infrastrukturen** geschlossen werden.

Auch wenn die Finanzierung von Wasserstoffnetzen gesichert wird, bedeutet das nicht, dass stromnetzdienliche Elektrolysestandorte automatisch finanziell attraktiv sind. Hier besteht ein weiterer Handlungsbedarf, geeignete Standorte attraktiv zu machen, zum Beispiel über eine Befreiung von Umlagen oder über die Einführung von nodalen bzw. zonalen Preisen im Stromgroßhandel. Auch die Einführung tiefer Netzanschlussentgelte⁸⁸ ist eine Möglichkeit, Netzaspekte bei der Standortwahl einzubeziehen. Grundsätzlich sind unterschiedliche Instrumente und Ansätze zur Standortsteuerung der Elektrolyseure denkbar. Eine genaue Analyse der Vor- und Nachteile verschiedener Optionen und eine Entscheidung dazu, gefolgt von entsprechenden politischen Weichenstellungen, sollten zügig angestrebt werden.

Neben den Elektrolyseuren als wichtiger Flexibilitätsoption für das Stromsystem zeigen die Studien langfristig einen hohen Bedarf an **Wasserstoffspeicherung**, da Wasserstoff in den Szenarien zur Absicherung der Energieversorgung in Backup-Kraftwerken genutzt wird. Wasserstoff lässt sich in untertägigen Salzkavernen in großem Umfang speichern und ist somit geeignet, um saisonale Schwankungen im Energieangebotssystem auszugleichen. Da sich die Produktion von grünem Wasserstoff im besten Fall an den erneuerbaren Energien orientiert, können Speicher (als Ergänzung zur Linepack-Flexibilität⁸⁹ der Wasserstofftransportleitungen) zudem sinnvoll sein, um bei fluktuierender Erzeugung die nahezu konstante Industrienachfrage zu bedienen. Die Entwicklung des Wasserstoffnetzes sollte daher neben den Elektrolysestandorten auch die Speicheranbindung berücksichtigen.

⁸⁸ Ariadne 2022.

⁸⁹ Linepack beschreibt das Volumen an Gas beziehungsweise Wasserstoff, welches in den Röhren der Gas- beziehungsweise Wasserstoffnetze gespeichert werden kann. Das netzinterne Speichervolumen kann durch eine Erhöhung beziehungsweise Verringerung des Betriebsdrucks variiert werden.

HF 13.4 Importe von Wasserstoff und SynFuels vorbereiten

Es besteht große Einigkeit darüber, dass Deutschland seinen Wasserstoffbedarf auch langfristig nicht basierend auf inländischer Produktion decken kann. Während Wasserstoff über Pipelines effizient aus dem europäischen Ausland importiert werden kann, werden Wasserstoffderivate in Zukunft vermutlich auch aus dem **außereuropäischen Ausland** kommen. Um langfristig Importe zu ermöglichen, sind bereits heute Vorkehrungen zu treffen. Innerhalb Europas sollten weitere Vorbereitungen für den Ausbau einer europäischen Pipeline-Infrastruktur für den Wasserstofftransport getroffen werden, auch unter Berücksichtigung der aktuell erwarteten Veränderungen bezüglich der mittelfristigen Nutzung von Erdgas-Pipelines. Insbesondere werden LNG-Importe eine stärkere Auslastung der Erdgas-Pipelines von West- nach Osteuropa und Süd- nach Nordeuropa erforderlich machen und somit die Möglichkeiten für die Umwidmung entsprechender Pipelines auf Wasserstoff reduzieren, solange der Erdgasbedarf noch in der heutigen Größenordnung liegt.⁹⁰

Für Länder außerhalb Europas laufen innerhalb der Energiepartnerschaften und über H2Global⁹¹ bereits Vorbereitungen für zukünftige Importe. Hier sind insbesondere auch **Nachhaltigkeitsaspekte** zu beachten – dies gilt sowohl für die CO₂-Bilanz der strombasierten Elektrolyse (gegebenenfalls kann hier der aktuell in der Verhandlung stehende delegierte Rechtsakt der EU zu synthetischen Brenn- und Kraftstoffen als Grundlage dienen) als auch für weitere Anforderungen, beispielsweise zur Minimierung der Umweltwirkungen des toxischen Ammoniaks. Außerdem wird auf eine **Diversität der Importländer** zu achten sein, um den Anforderungen an eine künftige Versorgungssicherheit Rechnung zu tragen. Weiterhin ist ein breiter gesellschaftlicher und politischer Diskurs notwendig, um festzulegen, inwieweit wertegeleitete Kriterien (wie zum Beispiel Demokratie, Pressefreiheit, Unabhängigkeit der Justiz), geopolitische Gesichtspunkte und die Resilienz von Lieferländern/Lieferketten eine Rolle spielen sollen.

Handlungsfeld 14:

Wärmeversorgung klimaneutral gestalten

HF 14.1 Sanierungsraten erhöhen

Niedrige Vorlauftemperaturen, die einen effizienten Betrieb von Wärmepumpen und die Integration von Abwärme und erneuerbaren Energien ermöglichen, sind am besten in sanierten Gebäuden zu erreichen. Zudem tragen höhere Sanierungsraten zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs bei. Modellrechnungen ermitteln daher regelmäßig in den kostenoptimalen Szenarien deutlich höhere Sanierungsraten als die aktuellen. Aufgrund der hohen Investitionen, die mit Sanierungen verbunden sind, ist hier weiterhin eine Förderung notwendig. Zudem spielt auch in diesem Zusammenhang das **Mieter-Vermieter-Dilemma** eine Rolle. Eine weitere Herausforderung liegt darin, dass ältere Hausbesitzer häufig vor aufwendigen Sanierungsmaßnahmen zurückschrecken. Voraussetzungen für Kredite und Tilgungszuschüsse könnten zudem vereinfacht werden – beispielsweise im Hinblick auf die teilweise notwendige Wärmebrückenberechnung.

⁹⁰ acatech/Leopoldina/Akademienunion 2022-1.

⁹¹ H2 Global Foundation, <https://www.h2-global.de/>

HF 14.2 Rahmenbedingungen für den Ausbau von zentralen und dezentralen Wärmepumpen und die Nutzung der Geothermie und der Solarthermie verbessern

Wärmepumpen in individuellen Gebäuden, Wärmenetzen und der Industrie sind zumindest für Niedertemperaturwärme die wichtigste Wandlungstechnologie zur Wärmebereitstellung im klimaneutralen Energiesystem. Als Niedertemperaturwärmequelle sollten je nach vorhandenem Potenzial erneuerbare Energien wie Geothermie und Solarthermie, aber auch Abwärmepotenziale genutzt werden.

Obwohl Wärmepumpen bereits jetzt für den Einsatz in einigen Gebäuden rentabel sind, werden häufig weiterhin andere Systeme verbaut. Hier kann eine Weiterführung der aktuellen Förderung für Wärmepumpen und gegebenenfalls ein Verbot fossiler Heizkessel die Wende zu klimaneutralen Lösungen im Wärmemarkt beschleunigen. Zudem ist die Aus- und Weiterbildung weiterer Energieberater*innen und Installateur*innen wichtig für eine entsprechende Beratung der Hauseigentümer*innen und eine sich anschließende Realisierung. Lösungen für das Mieter-Vermieter-Dilemma müssen ebenfalls implementiert werden. Ob die kürzlich von der Bundesregierung verabschiedete Lösung zur Aufteilung des CO₂-Preises zwischen Mieter*in und Vermieter*in hier ausreicht, muss zeitnah evaluiert werden. Aufgrund des gleichzeitigen Zubaus von Wärmepumpen und Elektromobilität entstehende Engpässe im Stromverteilnetz sind durch vorrausschauende und integrierte Planung der Netze zu vermeiden.

Zentrale **Großwärmepumpen** werden aktuell in Deutschland nur in sehr geringem Umfang eingesetzt. Im klimaneutralen Energiesystem müssen diese allerdings einen hohen Anteil der Fernwärme bereitstellen. Neben einer Förderung von Pilotprojekten, die technische Verbesserungen ermöglichen, sollte daher der breite Einsatz von Großwärmepumpen in der Industrie und im Bereich der Fernwärmeversorgung angereizt werden. Die teilweise bereits erfolgte Reform der Steuern, Abgaben und Umlagen ist hierfür ein wichtiger Schritt. Weiterhin werden in der ersten Hochlaufphase spezifische Investitions- oder Betriebskostenzuschüsse erforderlich sein, die im Förderprogramm Bundesförderung für effiziente Wärme(-netze) nun auch vorgesehen sind.

Eine besondere Rolle für die Erreichung einer klimaneutralen Wärmeversorgung kommt zudem der Nutzung der **Geothermie** zu. Sowohl die Potenziale der tiefen (1000 bis 5000 Meter), also auch der oberflächennahen und mitteltiefen Geothermie (50 bis 1000 Meter) in Kombination mit Wärmepumpen sind geeignet, den künftigen Bedarf an Niedertemperaturwärme weitgehend zu decken und wesentliche Anteile der benötigten industriellen Prozesswärme im Temperaturbereich bis 200 Grad Celsius bereitzustellen.

HF 14.3 Wärmenetze ausbauen, dekarbonisieren und flexibel betreiben

Neben den dezentralen Wärmepumpen ist ein Ausbau der Wärmenetze notwendig, insbesondere für eine klimaneutrale Wärmeversorgung in dicht besiedelten Gebieten. Um den effizienten Einsatz von Abwärme, erneuerbaren Energien und Wärmepumpen zu ermöglichen, ist zudem eine Umstellung auch bestehender Wärmenetze auf Niedrigtemperatur erforderlich. Der Aus- und Umbau von Wärmenetzen sollte weiterhin gefördert werden. Weitere Maßnahmen sind beispielsweise ein verpflichtender Anschluss von Abwärmepotenzialen oder der Zugang von Drittanbietern zu den Wärmenetzen, der bereits im Fit-for-55-Paket vorgeschlagen wird (Third Party Access). Weiterhin profitieren Wärmenetze auch von der unten empfohlenen kommunalen Wärmeplanung.

Wärmenetze können zudem auch entscheidend zur Flexibilisierung der Stromnachfrage beitragen und damit die Integration der variablen erneuerbaren Energien in das Stromsystem unterstützen. Es ist daher wichtig, beim Neu- und Umbau von Wärmenetzen darauf zu achten, dass eine flexible Fahrweise je nach verfügbarem Stromangebot möglich ist. Dies kann beispielsweise durch die Integration großskaliger Wärmespeicher in die Netze erfolgen.

HF 14.4 Kommunale Wärmeplanung verpflichtend machen

Für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung im Gebäudesektor gibt es keine allgemeingültigen Blaupausen. Sie wird aus einem Mix aus Maßnahmen bestehen, der auf die lokalen Gegebenheiten wie Bevölkerungsdichte, Siedlungsstruktur, EE-Potenziale etc. angepasst ist. Es sollte jedoch vermieden werden, konkurrierende Infrastrukturen unnötigerweise parallel auf- beziehungsweise auszubauen. Daher ist die kommunale Wärmeplanung ein zentrales Element, um eine langfristig sinnvolle und effiziente Strategie für die Wärmeversorgung zu entwickeln. Eine Verpflichtung der Kommunen, wie sie bereits in Baden-Württemberg und Schleswig-Holsteineingeführt wurde, wurde in den Koalitionsvertrag aufgenommen und sollte zügig umgesetzt werden.

Handlungsfeld 15:**Den technologischen Wandel für einen klimaneutralen Verkehrssektor vorantreiben**

Zentraler Bestandteil klimaneutraler Mobilität ist ein Modal Shift weg vom Pkw und hin zum Umweltverbund (Fahrradverkehr, Fußverkehr, ÖPV, Bahn). Um den Verkehrsmittelwechsel zu ermöglichen, müssen veränderte (Verkehrs-)Infrastrukturen geschaffen werden. Dies wurde bereits im Handlungsfeld 9 „Mobilität neu denken“ thematisiert. Zusätzlich zum Modal Shift ist die Umstellung konventioneller auf klimafreundliche Antriebe notwendig, sowohl im Straßenverkehr als auch im Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr. Dieser technologische Wandel geht wiederum mit einem Aus- und Umbau der (Energie-)Infrastrukturen einher (zum Beispiel Ladeinfrastruktur) und wird in diesem Handlungsfeld adressiert.

HF 15.1 Hemmnisse für den Umstieg auf batterieelektrische Fahrzeuge im Pkw-Bereich beseitigen

Im Pkw-Bereich sind batterieelektrische Fahrzeuge im Sinne einer Vollkostenrechnung bereits jetzt günstiger als Diesel- oder Otto-Pkw.⁹² Es sind vor allem die hohen Investitionsausgaben und die wahrgenommene fehlende Ladeinfrastruktur, die den Umstieg hemmen. Teilweise wird auch die geringere Reichweite als Argument gegen batteriebetriebene Fahrzeuge angeführt. Eine Förderung der batterieelektrischen Fahrzeuge über Kaufprämien hat in der ersten Phase des Markthochlaufes dazu beigetragen, Sichtbarkeit zu erzeugen und Skaleneffekte in der Produktion zu erreichen.⁹³ Diese Subventionen sollten nun jedoch auslaufen und politische Förderungen sollten sich auf den Abbau der genannten Hemmnisse konzentrieren.

Bezüglich der Investitionsausgaben schlägt Agora 2021 einen Umbau der Kfz-Steuer vor, damit diese beim Fahrzeugkauf ein deutliches Argument für batterieelektrische Fahrzeuge sind. Als Beispiel kann hier das Bonus-Malus-System in Frankreich genannt werden, bei dem hohe, einmalige Zulassungssteuern für Fahrzeuge mit hohen absoluten Emissionswerten erhoben werden. Zusätzlich kann Informations- und Aufklärungsarbeit bezüglich Alltagstauglichkeit und Kosten batteriebetriebener Fahrzeuge die Kundenakzeptanz stärken.

Ein wesentlicher Baustein ist der **Ausbau der Ladeinfrastruktur**. Diese wird unterteilt in private (in der Regel bei privaten Haushalten) und halböffentliche Lademöglichkeiten (in der Regel beim Arbeitgeber) einerseits sowie öffentliche Lademöglichkeiten andererseits. Der Förderbedarf der öffentlichen Ladeinfrastruktur ist von zwei wesentlichen Faktoren abhängig: der Wirtschaftlichkeit der öffentlichen Ladepunkte und dem Anteil öffentlicher Lademöglichkeiten an der Gesamtzahl aller Ladepunkte.

Der wesentliche Faktor für die Wirtschaftlichkeit eines öffentlichen Ladepunktes ist die Auslastung. Der Ausbau soll „dem Bedarf vorausgehen“⁹⁴, um das Henne-Ei-Problem zwischen Kaufentscheidung und Infrastrukturausbau zu lösen. Folglich ist in der Anfangsphase des Markthochlaufes eine Unwirtschaftlichkeit zu erwarten, welche durch entsprechende staatliche Förderung ausgeglichen werden muss. Für Standorte an öffentlichen Straßen wird auch zukünftig Unwirtschaftlichkeit prognostiziert. Als Alternative wird daher eine Fokussierung des Ausbaus auf Standorte des täglichen Lebens (zum Beispiel Kultur- und Sporteinrichtungen, Einkaufszentren) sowie auf das Schnelllademöglichkeiten an Autobahnen und vielbefahrenen Straßen diskutiert⁹⁵.

Eine Analyse der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) zeigt einen starken Einfluss des Verhältnisses von öffentlichen und nicht öffentlichen (privaten und halböffentlichen) Ladepunkten.⁹⁶ Steigt der Anteil der nicht öffentlichen Ladepunkte, dann kann der Anteil der öffentlichen Ladepunkte reduziert werden und liegt

92 BDI 2021.

93 dena 2021-1.

94 SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN UND FDP 2021.

95 Analysen der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) zeigen allerdings, dass die Phase der Unwirtschaftlichkeit je nach Standort bereits 2025 überwunden sein kann (NPM 2020-1). Die NPM empfiehlt darüber hinaus, die Auslastung durch zusätzliche Maßnahmen wie z.B. Reservierungsfunktion an Ladesäulen oder Parkgebühren nach dem Laden zu erhöhen.

96 NPM 2020-1.

unter Umständen deutlich unter dem Ziel der des Koalitionsvertrages der Bundesregierung, in dem öffentliche eine Million Ladepunkte bis 2030 genannt werden.⁹⁷ Ein regelmäßiges Monitoring der nicht öffentlichen Ladepunkten, aber auch der technologischen Entwicklungen, zum Beispiel beim Schnellladen, sind daher empfehlenswert. Auf Basis dessen sollte eine regelmäßige kritische Evaluierung des Förderziels für öffentliche Ladepunkte erfolgen, um eine Überförderung zu vermeiden.

Der Ausbau der Ladeinfrastruktur stellt auch Herausforderungen an die Stromverteilnetze und ist ein wesentlicher Faktor, der bei der Netzausbauplanung frühzeitig und vorausschauend berücksichtigt werden muss (siehe Handlungsfeld 4.1). Gleichzeitig kann die Lastflexibilisierung im Verkehrssektor durch gesteuertes Laden und Vehicle-to-Grid-Konzepte⁹⁸ zur Integration fluktuierender erneuerbarer Energien in die Stromnetze genutzt werden. Hierfür sind vor allem eine Standardisierung der Schnittstellen und Protokolle für den Ladevorgang sowie preisliche Anreize für die Bereitstellung von Flexibilität (zum Beispiel durch verfügbarkeitsvariable Stromtarife) notwendig.

Im Hinblick auf die nun von europäischer Seite und Industrie beschlossenen weitgehenden Elektrifizierungsstrategien der europäischen Pkw-Flotte sind Investitionen in die Ladeinfrastruktur eine No-Regret-Strategie. Der Ausbau von Schnellladesäulen entlang der Hauptverkehrsachsen kann zudem Hemmnisse bezüglich der Reichweitenachteile abbauen.

HF 15.2 Leitplanken für den Lkw-Verkehr festlegen

Im Lkw-Markt konkurrieren verschiedene Dekarbonisierungsoptionen wie batterieelektrische Fahrzeuge, Oberleitungs-Lkw sowie Brennstoffzellenfahrzeuge. Jede dieser Optionen stellt jedoch unterschiedliche Ansprüche an den Infrastrukturausbau mit zum Teil hohen Investitionsbedarfen. So ist zum Beispiel der Anteil an Brennstoffzellenfahrzeugen im künftigen Lkw-Markt weiterhin mit großen Unsicherheiten verbunden. Investitionen in die Wasserstofftankstellen-Infrastruktur abseits der großen paneuropäischen Autobahnen sind somit weiterhin mit großem Risiko behaftet und daher bisher unattraktiv.

Um attraktive Investitionsbedingungen zu schaffen, müssen daher Leitplanken gesetzt werden. Dabei gilt, dass direktelektrifizierte Technologien aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz grundsätzlich zu bevorzugen sind (siehe Handlungsfeld 5.1). Dennoch haben alle Technologien bestimmte Vorteile und Nachteile, unter denen es abzuwägen gilt. Wichtig ist hierbei eine enge europäische Abstimmung, da der Güterfernverkehr paneuropäisch stattfindet.

⁹⁷ Da private und halböffentliche Ladepunkte deutlich kostengünstiger ausfallen als öffentliche Ladepunkte, scheint eine weitere Förderung dieser Ladeeinrichtungen sinnvoll zu sein. Gleichzeitig muss gewährleistet werden, dass Pkw-Nutzer ohne eigenen Stellplatz (zum Beispiel in dicht besiedelten Stadtteilen) ausreichend öffentliche Lademöglichkeiten zur Verfügung haben und die Versorgung mit öffentlicher Ladeinfrastruktur auch in dünn besiedelten Regionen gegeben ist.

⁹⁸ Bedarfsabhängiges Entladen der Fahrzeugbatterie in das Stromnetz zum Ausgleichen von Spitzenlasten. Damit können die Fahrzeugbatterien als Zwischenspeicher für das Stromnetz genutzt werden.

Bei der Förderung der Dekarbonisierung der Lkw-Verkehrs sollte zudem berücksichtigt werden, dass die **Verlagerung großer Anteile des Güterverkehrs auf die Schiene** mit Nachdruck vorangetrieben werden sollte (siehe Handlungsfeld 9.4). Die Metaanalyse der Szenariestudien zeigt in allen Szenarien eine Steigerung der Güterverkehrsleistung auf der Schiene bis zum Zieljahr 2045/50. Ambitionierte Vorgaben werden in den Studien von dena 2021 und Agora 2021 mit einer Steigerung um 25 Prozent gemacht, in der Studie von UBA 2019 beträgt die Steigerung sogar bis zu 35 Prozent.

HF 15.3 Investitionen in den Schienennetzausbau priorisieren

Investitionen in den Schienennetzausbau müssen in den kommenden Jahren priorisiert werden. Die Personenverkehrsleistung auf der Schiene steigt bis 2045 um 80 Prozent in der Studie von dena 2021 und sogar um 160 Prozent in der Studie von Agora 2021. Diese Erhöhung der Fahrgastzahlen ist nur durch eine deutliche Ausweitung des Angebots möglich. Neben Investitionen in den Streckenausbau⁹⁹ ist eine Erhöhung der Kapazitäten insbesondere auch durch die umfassende Digitalisierung des europäischen Schienennetzes möglich.

Das bestehende Schienennetz ist derzeit zu 61 Prozent elektrifiziert.¹⁰⁰ Eine weitere, möglichst umfassende Elektrifizierung sowie die Umstellung auf klimaneutrale Antriebe wie Brennstoffzellenzüge auf den verbleibenden Strecken gehört daher ebenfalls zu den No-Regret-Optionen.

HF 15.4 Ambitionierte Quoten sowie Forschung und Entwicklung im Flug- und Schiffsverkehr vorantreiben

Ab den 2030er Jahren werden klimaneutrale Kraftstoffe im Flugverkehr (zum Beispiel synthetisches Kerosin) eine wichtige Rolle spielen. Damit der Markthochlauf bis dahin ein entsprechendes Stadium erreicht hat, werden in vielen Studien ambitionierte und verlässlich steigende Mindestquoten als zentrales Instrument genannt. Dabei beziehen immer mehr Studien neben dem nationalen auch den internationalen Flugverkehr in ihre Berechnungen ein und betonen, dass europäische Airlines vor Wettbewerbsnachteilen geschützt und langfristig auch außereuropäische Airlines von geeigneten Mechanismen erfasst werden müssen.¹⁰¹ Bisher wenig im Fokus der öffentlichen Diskussion standen **SynFuel-Quoten für den nationalen und internationalen Schiffsverkehr**. Auch hier können ähnliche Regeln gelten wie im Flugverkehr und die Quoten sollten schrittweise erhöht werden.

Zusätzlich besteht in beiden Bereichen ein dringender **Forschungsbedarf für die Entwicklung alternativer Antriebe**. Zwar gibt es bereits einzelne Pilotprojekte, die beispielsweise den Einsatz von Ammoniak oder Methanol als Kraftstoff im Schiffsverkehr erproben, der Eintritt in die Marktreife sollte jedoch weiter beschleunigt werden. Nicht zuletzt sollte auch weiterhin an direktelektrischen Antrieben vor allem für die Binnenschifffahrt und Kurzstreckenflüge geforscht werden, da sich diese durch hohe Energieeffizienz auszeichnen (siehe Handlungsfeld 5.1). Aufgrund ihres hohen spezifischen Energieaufwandes haben besonders für Kurzstreckenflüge die Vermeidung des Transportbedarfes und der Umstieg auf alternative Mobilitätsoptionen mit

⁹⁹ Im Bereich der Schienennetze gibt es sehr lange Planungs- und Umsetzungszeiträume für Bauvorhaben, welche momentan die angestrebte Transformation behindern und nach Möglichkeit beschleunigt werden sollten (vgl. dena 2021-1).

¹⁰⁰ BMDV 2021.

¹⁰¹ dena 2021-1.

geringerem Energieaufwand oberste Priorität (zum Beispiel Nachtzugverbindungen, Schnellzüge (siehe Handlungsfeld 9.5).

Die betrachteten Szenarien stimmen darin überein, dass der deutsche Bedarf an SynFuels hauptsächlich aus Importen gedeckt werden wird. Es ist daher wichtig, Energiepartnerschaften und Importinfrastrukturen rechtzeitig aufzubauen und einseitige Abhängigkeiten zu vermeiden (siehe Handlungsfeld 13.4).

6 Prozesse umstellen und Ressourcen schonen: Strategien zur klimaneutralen Industrie

Die Dekarbonisierung des Industriesektors ist aus verschiedenen Gründen eine besondere Herausforderung. Etwa ein Drittel der Treibhausgasemissionen in der Industrie geht auf **Prozessemissionen** zurück. Diese sind auf chemische Reaktionen und die verwendeten Grundstoffe zurückzuführen. Sie lassen sich daher nicht vermeiden oder erfordern den Umstieg auf gänzlich andere Rohstoffe oder Produktionsprozesse, etwa die Stahlproduktion per Direktreduktion von Eisenerz durch Wasserstoff anstelle der Hochofenroute oder die Verwendung alternativer Bindemittel bei der Zementherstellung. Eine weitere Herausforderung der Dekarbonisierung in der Industrie ist der Umstand, dass viele Industriebetriebe im **globalen Wettbewerb** stehen. Bei nationalen Klimaschutzmaßnahmen muss somit stets berücksichtigt werden, inwiefern diese die Wettbewerbsfähigkeit der von einem Instrument erfassten Betriebe verschlechtern könnten und wie dem ausgleichend entgegengewirkt werden kann, ohne die Klimaschutzwirkung abzuschwächen oder die Verlagerung von Produktion ins Ausland zu fördern. Europäische Lösungen sind daher nationalen Maßnahmen vorzuziehen. Eine weitere Besonderheit des Industriesektors ist die **Langlebigkeit seiner Produktionsanlagen**¹⁰², die eine frühzeitige Weichenstellung erforderlich macht, um Lock-ins in treibhausgasintensive Prozesse zu vermeiden. **Planungs- und Investitionssicherheit** für die Technologien zu schaffen, die aus Sicht der Transformationsszenarien schon bald erforderlich sind, ist daher ein wichtiges Ziel klimapolitischer Maßnahmen für die Industrie.

Neben der Reduktion der Produktionsbedarfe (siehe Handlungsfeld 11) sind drei Handlungsfelder maßgeblich, damit der Industriesektor seinen erforderlichen Beitrag zur Klimaneutralität leisten kann: klimaneutrale Prozesse etablieren, den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft fördern sowie Potenziale für Materialeffizienz und Materialsubstitution nutzen. Darüber hinaus ergeben sich weitere Handlungsfelder daraus, dass Gelegenheitsfenster genutzt werden müssen, indem bei anstehenden Ersatzinvestitionen die Voraussetzungen geschaffen werden, dass emissionsarme Technologien verwendet werden.

¹⁰² Im Sinne der Nachhaltigkeit ist die Langlebigkeit von Anlagen prinzipiell wünschenswert. Sie stellt nur dann ein Problem dar, wenn Anlagen nicht oder nur schwierig auf neue Prozesse umgestellt werden können. Sie könnten dann Emissionen auf lange Zeit festlegen ("committed emissions", Tong et al. 2019). In der Chemieindustrie werden Konzepte der modularen Produktion diskutiert, die eine flexible Anpassung von Anlagen an neue Anforderungen (beispielsweise neue oder modifizierte Produkte, schwankende Nachfrage) ermöglichen (siehe zum Beispiel Dechema 2017). Diese Ansätze könnten auch für die Umstellung auf klimaneutrale Prozesse hilfreich sein.

Handlungsfeld 16: Klimaneutrale Prozesse

Ein großer Teil der Treibhausgasemissionen in der Industrie entsteht durch die Produktionsprozesse, von allem durch die energetische Nutzung fossiler Energieträger für die Bereitstellung von Prozesswärme. In vielen Fällen reichen Effizienzsteigerungen dieser Prozesse nicht aus, um den Pfad zur Klimaneutralität zu unterstützen. Teilweise ist ein Umstieg auf gänzlich neue Prozesse notwendig. Ein Beispiel hierfür ist die Stahlproduktion, für die die Direktreduktion mit anschließender Bearbeitung im Lichtbogenofen die derzeit vielversprechendste Option zum Ersatz der emissionsintensiven Hochofenroute ist. Ebenso spielen neben den Energieträgern auch die eingesetzten Rohstoffe eine wichtige Rolle. Fossile Grundstoffe müssen wo immer möglich durch biogene Alternativen oder durch solche, die auf Basis von grünem Wasserstoff hergestellt wurden, ersetzt werden. Auch Prozessemissionen wie zum Beispiel in der Zementindustrie sind durch alternative Rohstoffe (hier vor allem alternative Bindemittel) zu vermeiden. Die vollständige Substitution ist jedoch technisch nicht überall möglich; die verbleibenden Emissionen müssen dann durch den Einsatz von Kohlenstoffabscheidung und -speicherung aufgefangen oder durch negative Emissionen ausgeglichen werden (vgl. Kap. 8).

Die Emissionen im Zusammenhang mit der industriellen Produktion ergeben sich aus verschiedenen Elementen entlang der Wertschöpfungskette und lassen sich in Teilintensitäten zerlegen. Diese sind die Emissionsintensität (Emissionen pro genutzter Energieeinheit), die Energieintensität (eingesetzte Energie pro erzeugter Materialeinheit), die Materialintensität (eingesetztes Material pro Produkteinheit) und die Produkt-Serviceintensität (eingesetzte Produktmenge für die Bereitstellung eines Services), welche jeweils miteinander und mit der Nachfrage nach dem Service multipliziert werden. Abbildung 11 zeigt eine schematische Darstellung der genannten Teilintensitäten. Die Minderungsoptionen der Industrie umfassen vor allem die Erhöhung der Energieeffizienz bei der Produktion durch verbesserte Prozesse und auch durch verstärktes Materialrecycling, die Erhöhung der Materialeffizienz in der Fertigung (zum Beispiel Reduktion von Verschnitt, Wiederverwendung von Materialien) sowie die Erhöhung der Materialeffizienz bei der Produktgestaltung (zum Beispiel verlängerte Produktlebensdauer, Leichtbauweise). Die Erhöhung der Emissionseffizienz kann zum Beispiel durch Nutzung erneuerbarer Energien erreicht werden und ist vor allem im Energiesektor zu verorten (siehe Kapitel 5), während die Erhöhung der Produkt-Dienstleistungseffizienz (zum Beispiel durch Carsharing oder höhere Gebäudeauslastung) oder die Reduktion der Dienstleistungsnachfrage ebenfalls außerhalb der Industrie anzusetzen sind (siehe Kapitel 4).

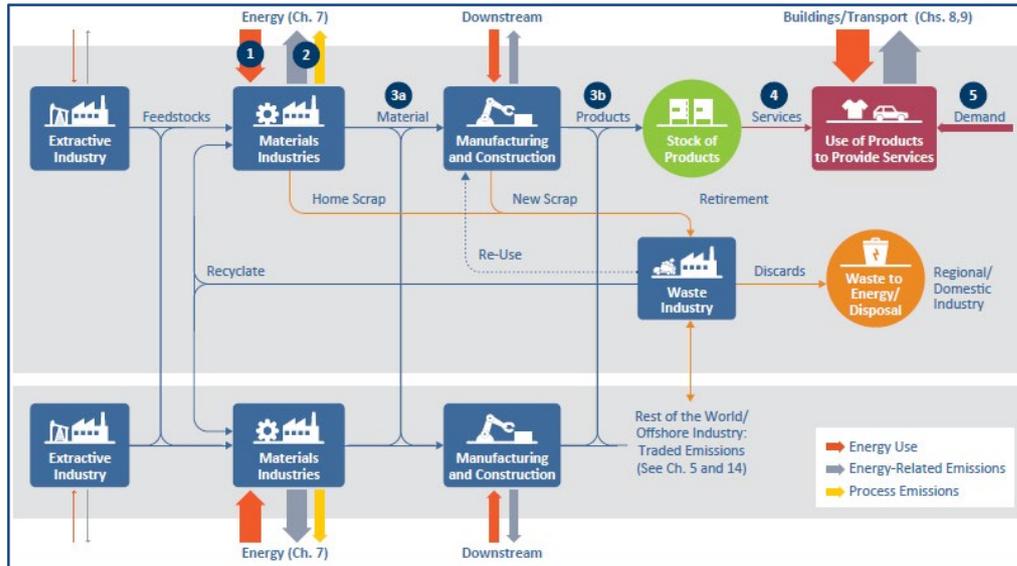


Abbildung 11: Industrielle Prozesse entlang von Wertschöpfungsketten. Die Minderungsoptionen lassen sich an unterschiedlichen Stellen entlang der Wertschöpfungsketten verorten.¹⁰³

HF 16.1 Elektrifizierungspotenzial der Industrie prioritär nutzen

Generell zeigen die untersuchten Szenarien, dass auch in der Industrie die direkte Elektrifizierung, vor allem der Prozesswärmebereitstellung, eine effiziente und wichtige Dekarbonisierungsstrategie darstellt. Die elektrische Dampferzeugung mit Wärmepumpen und Elektrodenkesseln beispielsweise hat mittlerweile einen hohen technologischen Reifegrad erreicht. Bei anderen Technologien wie elektrischen Industrieöfen in der Metallherzeugung ist dies noch nicht gleichermaßen der Fall. Dort, wo ausgereifte Technologien zur Verfügung stehen, ist es wichtig, die ökonomische Vorteilhaftigkeit dadurch zu fördern, dass Strom im Vergleich zu fossilen Brennstoffen günstig ist. Neben der CO₂-Bepreisung sind die weiteren Preisbestandteile des Strombezugs für Industriekunden mögliche Hebel, um dies zu gewährleisten. Hierbei sollte der systemdienliche Strombezug besonders gefördert werden, da elektrifizierte Prozesse prinzipiell ein großes Potenzial für Lastflexibilität bieten. Für die Bereitstellung von Lastflexibilität durch industrielle Verbraucher könnten eigene Vermarktungswege geschaffen oder zum Beispiel auch Vergünstigungen bei den Netzentgelten angeboten werden.

HF 16.2 Anreize für den Wechsel von grauem auf grünen Wasserstoff setzen

In den Prozessen, in denen Wasserstoff bereits heute als Grundstoff für die Produktion genutzt wird, beispielsweise bei der Methanol- oder Ammoniaksynthese, besteht bereits ein kurz- bis mittelfristig umsetzbares Emissionsreduktionspotenzial durch die Umstellung von grauem¹⁰⁴ auf grünen Wasserstoff. Auf diese Weise kann zum Beispiel auf Basis von Strom aus erneuerbaren Energien über die Wasserstoffproduktion per Elektrolyse klimaneutrales Methanol hergestellt werden, welches für die Umstellung der Produktion von High Value Chemicals (HVC) auf die **Methanol-to-Olefin-Route** benötigt wird. Aufgrund der momentan hohen Gestehungskosten von grünem Wasserstoff ist der Ersatz der Dampfreformierung durch Elektrolyse noch nicht wett-

¹⁰³ angepasst aus Abbildung 10.2, Fishedick et al. 2014.

¹⁰⁴ Fuel Cells and Hydrogen Observatory 2020.

bewerbsfähig. Über Carbon Contracts for Difference (CCfDs) könnte der Einsatz gefördert werden. Außerdem ist die Frage zu klären, welcher Anteil von Grundstoffchemikalien in Zukunft in Deutschland produziert oder importiert wird.

HF 16.3 Ziele für Anteile an klimaneutralen Grundstoffen für die Produktion setzen

Um die schrittweise erfolgende Substitution konventioneller durch klimaneutrale Grundstoffe voranzutreiben, ist die Einführung festgelegter Quoten denkbar. Diese könnten zunächst für besonders energieintensive Grundstoffe (Stahl, Zement) und für die wichtigsten Absatzmärkte (Bau, Automobilindustrie, Haushaltsgeräte, Windkraftanlagen) eingeführt und dann ausgeweitet werden. Die Vorgabe von Quoten für klimaneutrale Grundstoffe könnte jedoch zu Wettbewerbsverzerrungen und Verlagerungseffekten führen. Stattdessen erscheint es praktikabler, wenn Deutschland, besser noch die Europäische Union, einen schrittweise ansteigenden **Zielpfad für die Anteile klimaneutraler Grundstoffe in der Primärproduktion** setzt und dessen Einhaltung durch geeignete Instrumente unterstützt, zum Beispiel CCfDs.

Zugleich sollten Grundstoffhersteller verpflichtet werden, darzulegen, wie sie ihre Produktion auf klimaneutrale Prozesse umstellen werden. Eine solche Verpflichtung könnte zunächst für börsennotierte Unternehmen gelten und schrittweise weitere Unternehmen einbeziehen. Sie könnte auch als Voraussetzung für die (weiterhin) freie Zuteilung von Emissionszertifikaten und für andere Förderungen gelten. Ein Zieljahr, ab dem nur noch klimaneutral hergestellte Grundstoffe in EU verkauft werden dürfen, könnte zusätzlich die Umstellung erzwingen beziehungsweise dazu anreizen, mit negativen Emissionen nicht vermeidbare Emissionen auszugleichen.

HF 16.4 Bei allen Neuinvestitionen klimafreundliche Produktionstechnologien und -prozesse durch politische Rahmenbedingungen besserstellen

In den nächsten zehn Jahren steht bei vielen Industrieanlagen ein Austausch großer Anlagen an, so zum Beispiel bei Hochöfen in der Stahlindustrie. Aufgrund der langen Nutzungsdauern dieser Anlagen ist es dringend erforderlich, dass nur noch solche Prozessalternativen realisiert werden, die entweder bereits klimaneutral betreibbar sind (zum Beispiel elektrisch, was dann ab dem Zeitpunkt klimaneutral ist, ab dem das Stromsystem keine Treibhausgase mehr verursacht), oder die einfach zu solchen umgerüstet werden können. Wenn die klimaneutralen Prozessalternativen nicht wettbewerbsfähig sind, sollten sie gefördert werden, zum Beispiel durch eine Erhöhung bestehender Investitionsförderungen. Beispiele sind das Programm „Dekarbonisierung in der Industrie“, eine Deklaration als *Important Project of Common European Interest (IPCEI)* und der Europäische Innovationfonds. Eine ordnungsrechtliche Alternative dazu ist ein Verbot zur Neuerrichtung bestimmter Produktionsprozesse und Technologien, für die es bereits einsatzfähige Alternativen gibt. Neben der investitionsbasierten Förderung kann das Augenmerk auch auf die Betriebsphase verlagert werden, indem dafür gesorgt wird, dass grüne Sekundärenergieträger ausreichend und kostengünstig verfügbar sind. Hier ist es beispielsweise wirksam, elektrischen Strom möglichst wenig durch Abgaben und zu Umlagen belasten, um die Direktelektrifizierung anzureizen (siehe auch Handlungsfeld 3.1).

HF 16.5 Forschung und Hochskalierung von klimaneutralen Technologien und Prozessen mit geringem Reifegrad fördern

Um eine rechtzeitige Transformation der Industrie zu erreichen, müssen viele klimaneutrale Technologien bereits in den Jahren 2025 bis 2030 marktfähig sein. Durch gezielte Förderung der Forschung und Hochskalierung von innovativen Technologien könnte das erreicht werden. **Hochtemperaturprozesswärme** mit Wasserstoffbrennern oder die elektrische Wärmebereitstellung für Temperaturen ab 700 Grad Celsius haben beispielsweise ein geringes Technology Readiness Level. Sie könnten jedoch als Querschnittstechnologien in sehr vielen unterschiedlichen Industriebranchen eingesetzt werden, etwa in der Metallverarbeitung, Aluminium-Primärproduktion, Glasindustrie oder Zement- und Kalkindustrie (oder in anderen Einsatzfelder von Drehrohröfen).¹⁰⁵ Hier ist eine gezielte Forschungs- und Technologieförderung hilfreich, die sich vor allem auf Lösungen mit hohen Emissionsvermeidungspotenzialen durch breite Einsatzfähigkeit konzentriert.

Handlungsfeld 17:

Aufbau einer Kreislaufwirtschaft

Neben der Umstellung aller emissionsintensiven Prozesse ist es ebenso wichtig, **Materialkreisläufe zu schließen**, um den Bedarf an Primärproduktion zu reduzieren. Zum Konzept der Kreislaufwirtschaft gehören verschiedene Strategien. Deren Ziel ist unter anderem, die Langlebigkeit von Produkten sowie deren Wiederverwendbarkeit und Reparierbarkeit zu fördern sowie zu ermöglichen, dass ein Produkt nach der Nutzung einfach in seine Bestandteile zerlegt werden kann, die dann jeweils als Ausgangsstoff für neue Produkte verwendet werden können. Zwar wurden entsprechende Ziele bereits 1994 mit der Einführung des Gesetzes zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen (heute Kreislaufwirtschaftsgesetz) gesetzlich verankert, jedoch sind kurzlebige und Wegwerfprodukte weiterhin weit verbreitet, und die thermische Verwertung von Abfällen hat gegenüber der rohstofflichen Verwertung immer noch einen hohen Anteil. Zu einer Strategie für eine Kreislaufwirtschaft zählen zunächst Verhaltensänderungen wie die Vermeidung von Konsum und die Förderung von Wiederverwendung, welche in Handlungsfeld 11 diskutiert werden. Seitens der Industrie können diese Verhaltensänderungen durch die Produktion wiederverwendbarer, langlebiger Produkte ermöglicht werden. Zentral ist außerdem die Sekundärproduktion von Materialien.

HF 17.1 Gesetzliche Standards für die Herstellung recycelbarer Produkte setzen

In Erweiterung bestehender Gesetze und Verordnungen müssen Standards für recycelbare Produkte eingeführt werden, die Hersteller verpflichten, Produkte so zu konzipieren, dass das Recycling einfach möglich ist. Ein Beispiel für aktuelle Hemmnisse beim Recycling ist die große Diversität von Kunststoffen oder Metalllegierungen. Eine Begrenzung der Anzahl von Additiven für Kunststoffe oder eine Reduktion auf wenige Standardlegierungen für die jeweils erforderlichen Spezifikationen kann diese Diversität reduzieren, sodass Recyclingprozesse besser auf die verbleibenden Materialien abgestimmt werden können. Darüber hinaus kann die Recyclingfähigkeit auch dadurch ge-

¹⁰⁵ European Commission 2022.

steigert werden, dass digitale Informationen über die Zusammensetzung und die verwendeten Materialien zu einem Produkt zur Verfügung gestellt werden, die durch potentielle Wiederverwerter eingesehen werden können, um Materialien und Komponenten bestmöglich zu verwerten.

HF 17.2 Sammlung und Logistik für Recycling verbessern

Technologien zum chemischen Recycling von Kunststoffen haben mittlerweile einen hohen technologischen Reifegrad und stellen eine bessere Alternative als die Verbrennung dar. Aus Plastikmüll können so durch Gasifizierung oder Pyrolyse wieder Rohmaterialien für die chemische Industrie bereitgestellt werden, wo sie fossile Grundstoffe wie beispielsweise Naphtha ersetzen. Zur Förderung dieser Technologien sind Sammel- und Logistiksysteme erforderlich, die zum Beispiel über geeignete Regeln bei der Müllsammlung (vor allem Grüner Punkt) gefördert werden können. Hierbei ist darauf zu achten, dass Müll und die gewonnenen Stoffe nicht über unnötig weite Strecken transportiert werden, sondern die Stoffwiedergewinnung in einem sinnvollen Verhältnis zum Aufwand für Sammlung und Transporte steht.

HF 17.3 Zielquoten für Sekundärmaterialien einführen

Bei den in Handlungsfeld 16.4 vorgeschlagenen Zielen für die Anteile klimaneutraler Grundstoffe könnten auch Sekundärmaterialien einbezogen werden, um zu bewirken, dass durch ihren Einsatz auch tatsächlich Primärmaterialien eingespart werden. Aktuell gelten zwar Quoten und Zielpfade für die Wiederverwendung von Verpackungsmaterialien, jedoch können diese auch durch niederwertige Wiederverwendung von Stoffen (Downcycling) oder durch den Export von Plastikmüll erfüllt werden, sodass tatsächliches Recycling deutlich weniger stattfindet. Zudem ist, vor allem beim Plastik, die Verwendung von Primärmaterialien derzeit meist wirtschaftlich attraktiver als die Nutzung von Rezyklaten. Zielpfade und eine darauf abgestimmte Förderung können helfen, dass Materialien tatsächlich und möglichst gleichwertig wiederverwendet werden. Ein weiteres mögliches Instrument, um die Wiederverwendbarkeit und die tatsächliche Wiederverwendung von Materialien zu steigern, sind Rücknahmeverpflichtungen der Hersteller für ihre Produkte. Dies setzt Anreize dafür, Produkte so zu gestalten, dass die in ihnen verwendeten Materialien kostengünstig und möglichst wertsicherhaltend zurückgewonnen werden können. Es könnte zudem eine Klimaabgabe auf ausgewählte Materialien wie Stahl, Plastik, Aluminium und Zement in Endprodukten eingeführt werden, die unabhängig von den CO₂-Emissionen der Herstellung des Produktes ist, um die Förderung von klimaneutralen Materialien zu finanzieren und um Anreize zur Ressourceneffizienz zu schaffen.

Handlungsfeld 18:

Materialeffizienz und Materialsubstitution fördern

Die Lebenszyklusemissionen verschiedener Materialien und der für ihre Herstellung angewendeten Prozesse unterscheiden sich teilweise erheblich. Zum Beispiel können holzbasierte Bauelemente gegenüber traditionellen Wohnbaumethoden und -materialien sowohl Prozessemissionen als auch Energie bei der Herstellung des Materials einsparen. Diese „grauen Emissionen“, also die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung eines Materials entstehen, spielen bisher jedoch als Entscheidungskriterium bei der Materialauswahl eine zu geringe Rolle, und es herrscht auch keine Transparenz

hierüber. Dies könnte eine Kennzeichnungspflicht ändern. Teilweise sprechen auch bestehende Produktnormen gegen eine Verwendung klimafreundlicher Materialien, was ein Hemmnis für deren Verwendung darstellt.

HF 18.1 Kennzeichnungspflichten des Produkt-Fußabdrucks auf Basis von Lebenszyklusanalysen

Um die Nutzung klimafreundlicher Materialalternativen in Produkten voranzutreiben, sollte eine Kennzeichnungspflicht für den CO₂-Fußabdruck, inklusive aller Lebenszyklusphasen, für Produkte eingeführt werden. Wenn dieser nach festgelegten, idealerweise EU-weiten Standards ermittelt wird, können Produkte der gleichen Kategorie miteinander verglichen werden und Klimafreundlichkeit kann zum Kaufkriterium für Endverbraucher werden (siehe Handlungsoption „Konsum klimafreundlicher Produkte politisch fördern“). Hierbei sollte beachtet werden, dass zwischen hohen Anforderungen an die Genauigkeit und die flächendeckende Umsetzbarkeit einer solchen Kennzeichnung Zielkonflikte bestehen können. Die Verwendung von emissionsarmen Materialien und Grundstoffen wie zum Beispiel Sekundärstahl, Stahl aus Direktreduktion oder Kunststoffzyklate in den Produkten ist dann eine Möglichkeit, um den CO₂-Fußabdruck des Produktes zu verringern. Im öffentlichen Sektor sollten Beschaffungsquoten oder verbindliche Vorgaben für eine nachhaltige Beschaffung bei Materialien und Endprodukten eingeführt werden.

HF 18.2 Anpassung der Bau- und Produktnormen

Bau- und Produktnormen sowie Vorschriften müssen kontinuierlich angepasst werden, um Materialeffizienz und -substitution sowie die Nutzung neuer Baustoffe zu vereinfachen. Für den Einsatz von klimafreundlichen Baustoffen wie beispielsweise Holz bestehen aktuell baurechtliche Hemmnisse, die sich vor allem aus Brandschutzvorgaben ergeben. Sie stellen teilweise erhebliche Benachteiligungen für Holzbauten gegenüber Bauten aus anderen Baustoffen dar. Auch um andere neue Materialien wie Zement auf Basis alternativer Bindemittel im Bau nutzbar zu machen, müssen aufwendige Zulassungsverfahren durchlaufen werden, die diesen Einsatz teilweise übermäßig erschweren und verzögern. Hier gilt es, durch beschleunigte Genehmigungsverfahren den zügigen Einsatz klimafreundlicher Stoffe zu ermöglichen. Darüber hinaus könnten „graue Emissionen“ der Baumaterialien bei deren Zulassung einbezogen und auch als Kriterium für die Erteilung von Baugenehmigungen herangezogen werden.

Handlungsfeld 19:

Effektivität von CO₂-Preisen und Investitionssicherheit erhöhen

„Graue Emissionen“ spielen oft deshalb als Entscheidungskriterium bei der Produktion keine Rolle, weil sich CO₂-Preise durch kostenlose Zuteilungen von Zertifikaten im Rahmen des EU-ETS bisher kaum in den Produktkosten niederschlagen;¹⁰⁶ Importmaterialien von außerhalb der europäischen Union unterliegen meist gar keiner Bepreisung von Treibhausgasemissionen. Hier ist es wichtig, dass CO₂-Preise tatsächlich wirksam werden können, wobei einer Verlagerung der Produktion ins Ausland vorge-

¹⁰⁶ Dieser Effekt ergibt sich aus der freien Zuteilung in Kombination mit der Definition der Benchmarks (siehe Agora Industrie 2021, S. 35 f).

beugt werden muss. Preisrisiken, die durch die Verwendung klimaneutraler Materialien entstehen können, sollten durch Differenzverträge abgemildert werden. Die aktuelle Überarbeitung der Richtlinie zum EU-Emissionshandel (EU ETS) beinhaltet in diesem Zusammenhang bereits wichtige Elemente: insbesondere sind eine Zuteilung freier Zertifikate auch für emissionsarme Alternativprozesse sowie die Einführung eines Grenzausgleichsmechanismus für die CO₂-Bepreisung in Kombination mit einem Auslaufen der freien Zuteilung für die betroffenen Sektoren vorgesehen.

HF 19.1 CO₂-Differenzverträge einführen

Regulatorische Risiken für Investoren können temporär durch Carbon Contracts for Difference (CCfD) abgesichert werden, bis die Investitionsanreize auf Basis des ETS ausreichen, um Investitionen in klimaneutrale Technologien anzureizen. Dieses Instrument kann dazu beitragen, dass Reinvestitionen zwischen 2020 und 2030 nur noch in tatsächlich oder – durch Verwendung von Strom oder grünem Wasserstoff beziehungsweise durch einfache Umrüstung – potenziell klimaneutrale Technologien erfolgen. Bei Investitionen in CO₂-arme Schlüsseltechnologien erhalten Unternehmen für vermiedene CO₂-Emissionen projektbezogene Betriebskostenzuschüsse, um ihre Risiken zu reduzieren. Die konkrete Förderhöhe könnte über Auktionen ermittelt werden, zu denen prinzipiell alle Unternehmen Zugang haben. Die Einführung eines solchen Förderinstruments ist für 2023 geplant. Differenzverträge sind als Übergangsmechanismus zu verstehen, bis die Investitionsanreize durch den EU-ETS ausreichen. Dies ermöglicht es, Wettbewerb zwischen den einzelnen Anlagen herzustellen, da keine vollständige Umstellung auf klimaneutrale Produktionsprozesse innerhalb des Übergangszeitraums angestrebt wird.

HF 19.2 CO₂-Preise und Carbon-Leakage-Schutz austarieren

Die EU-Kommission hat auf Anfrage des Europäischen Rates einen Grenzausgleichsmechanismus (englisch: *Carbon Border Adjustment Mechanism*, kurz: *CBAM*) für CO₂-Preise in die Neufassung der ETS-Richtlinie aufgenommen. Ein zentrales Ziel dabei ist es, Anreize zur Verlagerung von Produktion und Emissionen CO₂-intensiver Produktion (also vor allem der Grundstoffherstellung) ins Ausland zu vermeiden und dennoch Anreize für Emissionsminderungen durch CO₂-Preise beizubehalten. Importeure von Grundstoffen (Stahl, Zement, Düngemittel) sollen die international angefallenen Emissionen berichten und dafür Emissionszertifikate einreichen. Damit soll eine Gleichbehandlung europäischer und internationaler Produktion erreicht werden. Gleichzeitig soll die bisherige kostenlose Vergabe von Emissionszertifikaten schrittweise auslaufen. Allerdings gab es starken Widerstand einiger Mitgliedsländer gegen eine nennenswerte Reduktion der freien Allokation, da Exporte und die Wertschöpfungskette im Vorschlag nicht erfasst werden können und somit einige Risiken von Verlagerung von Produktion und Emissionen verbleiben.

Die eingeschränkte Erfassung von Materialien (Stahl, Zement, Düngemittel) und Wertschöpfungsketten (nur Grundstoffprodukte) führt dazu, dass die größten Importströme, die erfasst werden sollen, aus Ukraine, Russland und der Türkei kommen. Mit der Invasion der Ukraine gilt es wohl in Zukunft eher gemeinsam den Wiederaufbau der Ukraine zu gestalten, während der Handel mit Russland von anderen Fragestellungen dominiert wird. Somit ergibt sich hier eine weitere Motivation, die Ausgestaltung des CBAMs hin zu einem effektiven Transformationsinstrument sicherzustellen.

7 Kohlenstoffmanagement für einen Transformationspfad zu netto-negativen Emissionen

Um auf einen Transformationspfad hin zu Netto-Null-Treibhausgasemissionen und gegebenenfalls zu einem späteren Zeitpunkt sogar netto-negativen THG-Emissionen zu gelangen, müssen die Weichen zeitnah gestellt werden. Denn viele der erforderlichen Verfahren müssen noch in großem Maßstab erprobt werden. Zudem besteht weiterer Forschungsbedarf zu den Umweltauswirkungen. Die europäischen Industrieländer, die einen Großteil der historischen Emissionen verursacht haben, tragen hier eine besondere Verantwortung. Deutschland sollte sich daher auf **EU-Ebene** dafür einsetzen, eine **ambitionierte Strategie für die CO₂-Entnahme** zu entwickeln.

Die Strategie zur CO₂-Entnahme sollte in eine **übergeordnete Kohlenstoffmanagement-Strategie** eingebettet werden, die zusätzlich CCS für fossile CO₂-Emissionen, die nicht rechtzeitig im erforderlichen Maß heruntergefahren werden können, und CCU umfasst. So könnten Synergieeffekte gehoben werden, die sich aus den Schnittstellen der drei Verfahren insbesondere hinsichtlich geologischer Speicherung und Carbon-Capture-Technologien ergeben.

Abbildung 12 stellt verschiedene mögliche Kohlenstoffpfade dar. In Abhängigkeit der Herkunft des CO₂ (atmosphärisch, biogen oder fossil) sowie der Dauerhaftigkeit der CO₂-Speicherung (keine Speicherung, Speicherung in kurzlebigen Produkten, Speicherung in langlebigen Produkten oder Speicherung im Untergrund) ergeben sich unterschiedliche CO₂-Bilanzen. Während zum Beispiel bei BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) und BECCUS (Bioenergy with Carbon Capture, Utilisation and Storage) netto-negative Emissionen erzielt werden, ist der Gesamtprozess bei BECCU (Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation) netto-CO₂-neutral. Wird hingegen fossiles CO₂ verwendet und dieses zum Beispiel in kurzfristigen Produkten gespeichert (CCU, Carbon Capture and Utilisation), so werden im Gesamtprozess Netto-Emissionen freigesetzt.

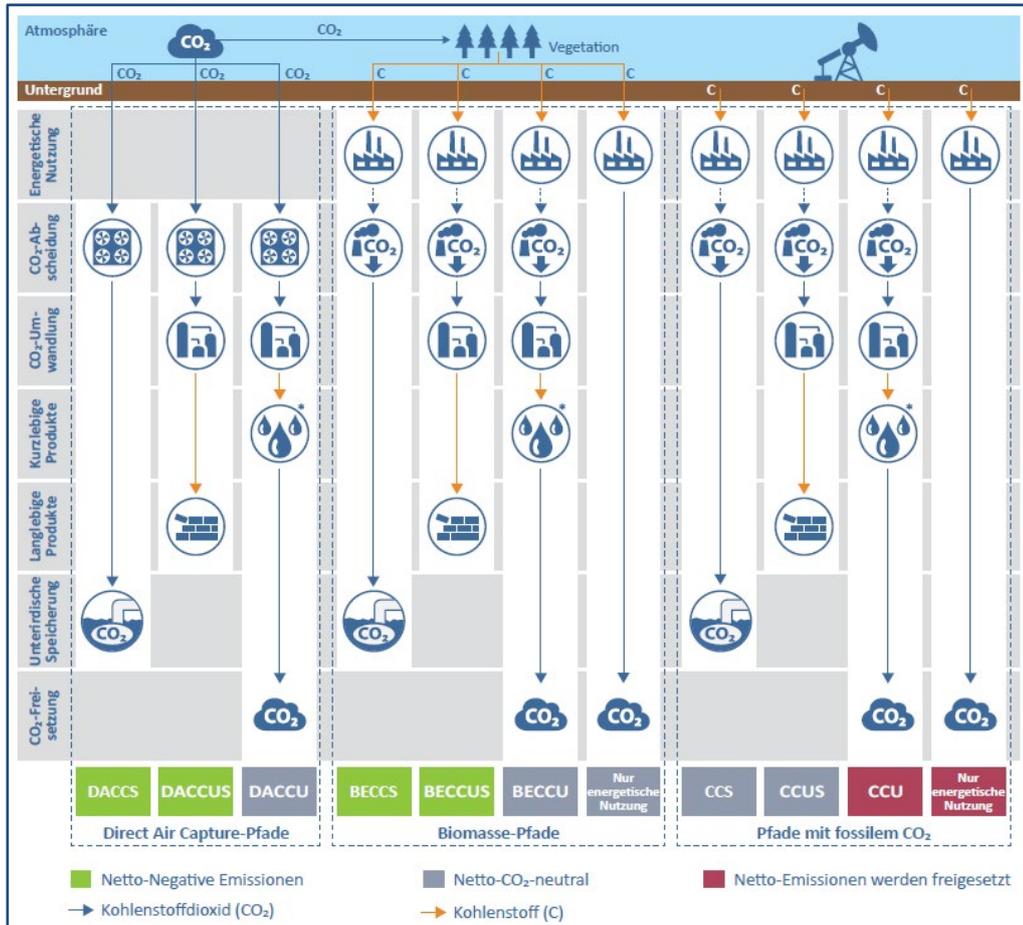


Abbildung 12: Darstellung ausgewählter Kohlenstoffpfade. Eigene Darstellung, Definition BECCUS, DACCUS, CCUS nach IPCC¹⁰⁷. *Wird ein kurzlebige Produkt (z.B. Kohlenstoff) am Ende seiner Lebenszeit in Müllverbrennungsanlagen verwertet und das dabei entstehende CO₂ aufgefangen, werden in dem Prozess unter Voraussetzung der Verwendung biogenen (BECCU) oder atmosphärischen (DACCU) CO₂ netto-negative Emissionen erzielt. Wird fossiles CO₂ verwendet (CCU), ist der Prozess netto-CO₂ neutral.

CDR, CCS und CCU sind teilweise gesellschaftlich umstritten, teilweise in der Bevölkerung noch relativ unbekannt und daher wenig diskutiert. Um eine Strategie zu entwickeln, die von der breiten Bevölkerung mitgetragen wird, ist ein **gesellschaftlicher Prozess mit Bürgerbeteiligung** (gegebenenfalls europaweit) erforderlich. Die Bundesregierung sieht im Koalitionsvertrag die Erarbeitung einer Langfriststrategie zum Umgang mit „den etwa 5 Prozent unvermeidbaren Restemissionen vor“¹⁰⁸ und verweist in diesem Zusammenhang auf die Notwendigkeit technischer Negativemissionen. Eine solche **Langfriststrategie** könnte die im Folgenden aufgeführten Bausteine beinhalten.

¹⁰⁷ IPCC 2018.

¹⁰⁸ SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN UND FDP 2021.

Handlungsfeld 20:

CDR – CO₂-aus der Atmosphäre entfernen

HF 20.1 Ziele und Verantwortlichkeiten festlegen

Die Möglichkeit, Emissionen durch CO₂-Entnahme auszugleichen, wird neue Verteilungsdebatten hervorrufen: Welche Mitgliedsstaaten, Sektoren und Unternehmen dürfen in einem netto-klimaneutralen Europa noch Restemissionen verursachen? Wer muss diese mit CDR ausgleichen und wer zahlt dafür?

Von zentraler Bedeutung ist, sicherzustellen, dass die Aussicht auf spätere CO₂-Entnahme nicht dazu verleitet, bei der Verminderung der Emissionen zu wenig ambitioniert zu sein. Denn dies würde die Verantwortung für den Klimaschutz auf folgende Generationen abschieben und wäre zudem sehr riskant, da die Potenziale und Nebenwirkungen der CO₂-Entnahmeverfahren noch nicht ausreichend erforscht sind und bei einem Überschreiten der Temperaturschwelle – selbst wenn dies nur vorübergehend ist – auch irreversible Schäden auftreten können. Andererseits wäre es aber auch riskant, aufgrund der befürchteten Konkurrenz mit Vermeidungsmaßnahmen die Weiterentwicklung der CO₂-Entnahmeverfahren zu vernachlässigen. Denn dann würde später ein essenzieller Baustein für den Klimaschutz fehlen. Im Sinne des Vorsorgeprinzips ist es daher unerlässlich, die weitere Erforschung und Entwicklung der CO₂-Entnahmeverfahren ambitioniert voranzutreiben und diese auch politisch und gesellschaftlich als Teil der Klimaschutzstrategie zu diskutieren. Eine **gesetzliche Festlegung des angestrebten Verhältnisses zwischen Emissionsminderungen und CDR** (zum Beispiel 95 Prozent Minderung, 5 Prozent CDR) würde die Priorisierung der Treibhausgasvermeidung sicherstellen.

Um ein geeignetes und von der Gesellschaft mitgetragenes Verhältnis von Emissionsvermeidung und CDR zu ermitteln, ist eine breite Diskussion unter Beteiligung von Stakeholdern sowie Bürgerinnen und Bürgern erforderlich, welche **Restemissionen** in welchen Bereichen zukünftig toleriert werden sollen. Dabei ist zu ermitteln und transparent zu kommunizieren, welche Vermeidungsmöglichkeiten in den verschiedenen Bereichen bestehen beziehungsweise zukünftig entwickelt werden können, und mit welchen Kosten und ökologischen und sozialen Auswirkungen diese verbunden sind.

Eine weitere wichtige Frage ist, **wie CDR regulatorisch in die Klimapolitik in Deutschland und EU integriert werden kann**. Gegebenenfalls ist es sinnvoll, technische Verfahren wie DACCS und BECCS an den ETS anzukoppeln, während landbasierte Verfahren wie Aufforstung und Kohlenstoffbindung im Boden in LULUCF integriert werden.

Neben den Klimaeffekten sind weitere **ökologische und soziale Auswirkungen der CDR-Maßnahmen** zu berücksichtigen. Bei den landbasierten Verfahren (Biomasseproduktion für BECCS, Aufforstung, Kohlenstoffbindung im Boden, Beschleunigte Verwitterung) sind einerseits die Auswirkungen auf Ökosysteme zu beachten. Bei der Ausarbeitung von Bedingungen für CDR-Projekte kann hier gegebenenfalls auf Er-

fahrungen mit der **Regulierung für Bioenergie** im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II)¹⁰⁹ zurückgegriffen werden. Andererseits sind soziale Verteilungswirkungen zu berücksichtigen, etwa wenn Landpreise und Preise landintensiver Produkte bei einem erhöhten Einsatz landbasierter CO₂-Entnahmeverfahren steigen.

HF 20.2 Klare Regeln für das Accounting definieren

Damit die Klimaeffekte einer CDR-Maßnahme richtig bewertet werden, ist ein korrektes Accounting unerlässlich. Klare Accounting-Regeln sind zudem eine regulatorische Voraussetzung für Anreizsysteme für CDR.

Ein wichtiger Aspekt ist dabei die **Permanenz der CO₂-Speicherung und das Risiko der Reversibilität**. Insbesondere bei der Speicherung von Kohlenstoff in Vegetation und Boden ist nicht sichergestellt, dass der Kohlenstoff über hunderte oder tausende von Jahren gebunden bleibt. Dennoch kann auch eine Speicherung über Jahrzehnte einen sinnvollen Beitrag leisten, um übergangweise die Atmosphäre zu entlasten, bis beständigere Speichermethoden zur Verfügung stehen. Dies gilt umso mehr, als durch die CDR-Maßnahmen auch andere Ökosystemdienstleistungen befördert werden. Um dem Rechnung zu tragen, bieten sich flexible Konzepte an wie beispielsweise das **Tonnenjahr**, bei dem auf Basis einer vorher festgelegten Bindungsdauer die CO₂-Speicherung vergütet wird.¹¹⁰ Die Dauer der Speicherung ist für die verschiedenen CDR-Verfahren weiter zu erforschen, um diese realistisch einschätzen zu können.

Langfristig sind **Accounting-Regeln auf UN-Ebene** zu etablieren. Ein erster Schritt auf diesem Weg wäre, wenn die EU Ansätze und Standards entwickelt und erprobt, die anschließend auf internationaler Ebene übernommen werden können. Dafür sollte sich Deutschland auf EU-Ebene einsetzen. Für den Aufbau eines Accounting-Systems könnten dabei die Erfahrungen aus LULUCF Inventories und Forest Reference Levels genutzt werden. Im Rahmen des „Fit-for-55“-Pakets hat die Europäische Kommission bereits Vorschläge für die Änderung der LULUCF-Verordnung veröffentlicht, die für ein solches Accounting wichtig sind.¹¹¹

¹⁰⁹ EU 2018.

¹¹⁰ Bier et al. 2020.

¹¹¹ Beispielsweise soll ab 2026 die No-Debit Rule mit expliziten Zielen für die Mitgliedsstaaten ersetzt werden und nach 2026 ganz auf die aktuell geltenden Accounting-Regeln verzichtet werden. Stattdessen sollen die Emissionen aus den nationalen Inventaren direkt mit den Zielen verglichen werden.

HF 20.3 CO₂-Entnahmeverfahren entwickeln und erproben, Risiken bewerten

Damit in einigen Jahrzehnten die CO₂-Entnahme in erforderlichem Umfang gelingen kann, müssen CDR-Verfahren (CDR) rechtzeitig weiterentwickelt und in die Anwendung gebracht werden.

Bei den einzelnen CDR-Verfahren bestehen noch **große Unsicherheiten**. Die Potenziale von CDR-Verfahren, die natürliche Senken vergrößern (Aufforstung, Kohlenstoffbindung im Boden), werden vor allem vom späteren Klima bestimmt. Die Potenziale von CDR-Verfahren, die CCS nutzen oder aufwendige, noch in der Entwicklung befindliche technische Anlagen benötigen, hängen stark von gesellschaftlichen und politischen Entscheidungen ab. Bei der Bewertung der Verfahren ist der gesamte Lebenszyklus in Betracht zu ziehen. Unter anderem kann ein hoher Rohstoffbedarf, beispielsweise Stahl und Beton für DAC-Anlagen, das Potenzial limitieren und den Treibhausgasausstoß in die Höhe treiben, solange die verwendeten Materialien nicht klimaneutral hergestellt wurden.¹¹² Eine **Diversifizierung** mit einem **breiten Mix an CDR-Verfahren** kann das **Gesamtrisiko minimieren**. Daher sollte auch die **Forschungsförderung eine große Bandbreite an CDR-Verfahren berücksichtigen**. Auch im Hinblick auf die gesellschaftliche Diskussion wäre es hilfreich, die verschiedenen Methoden nicht gegeneinander auszuspielen, sondern beispielsweise anhand von Szenarien zu kommunizieren, wie sich die verschiedenen CDR-Technologien in einem Transformationspfad zu einem klimaneutralen Gesamtsystem ergänzen und zu netto-negativen CO₂-Emissionen beitragen können. Hierbei muss über den Zeithorizont 2045 hinausgedacht werden. Denn ein Technologiemix, der THG-Neutralität ermöglicht, ist gegebenenfalls für netto-negative THG-Emissionen im erforderlichen Umfang in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts nicht ausreichend. Hier sind insbesondere Szenarien, die CCS ausschließen, einer kritischen Überprüfung zu unterziehen.

Um auf die Unsicherheiten bei den verschiedenen Technologien reagieren zu können, ist eine **regelmäßige Bewertung der Potenziale und Risiken der verschiedenen CDR-Verfahren**, insbesondere der Auswirkungen auf Ökosysteme, erforderlich. Eine **lernende, adaptive Regulatorik** ermöglicht es, auf neue Erkenntnisse schnell zu reagieren. Die umfangreichen Erfahrungen mit der Regulierung von Bioenergie im EEG und der RED können helfen, Risiken für Ökosysteme in geeigneter Weise zu berücksichtigen.

HF 20.4 Anreize für den Einsatz von CDR schaffen

Viele CDR-Verfahren werden unter den gegebenen rechtlichen Rahmenbedingungen zunächst nicht wirtschaftlich sein. Die CO₂-Entnahme stellt ein öffentliches Gut dar, dessen Wert sich nicht in den Märkten widerspiegelt. Damit liegt eine klassische Situation für staatliche Intervention vor. Ein technologieoffener Wettbewerb unter den verschiedenen Verfahren würde voraussichtlich dazu führen, dass technisch ausgereifte beziehungsweise einfache Verfahren wie Aufforstung einen Vorteil haben gegenüber neueren, komplexeren Verfahren wie DACCS oder Enhanced Weathering. In Szenarien zeichnet sich jedoch ab, dass längerfristig die Potenziale der kostengünstigsten Verfahren nicht ausreichen, um die Klimaschutzziele zu erfüllen. Daher sollte geprüft

¹¹² Dies gilt ebenso für alle anderen Technologien mit hohem Materialbedarf. Wenn die Bilanz lediglich in einer Übergangsphase ungünstig ausfällt, in der die Materialien für den Bau der Anlagen noch treibhausgasintensiv in der Herstellung sind, kann eine Förderung der Technologien, um sie in den Markthochlauf zu bringen, dennoch sinnvoll sein.

werden, ob eine **zeitlich begrenzte technologiespezifische Förderung** für bestimmte Verfahren erforderlich ist, um Lerneffekte zu ermöglichen. In der Ausgestaltung der kurz-, mittel- und langfristigen Maßnahmen zur Förderung von CDR könnte das Phasenmodell als Vorbild dienen, das eine Studie für die Wissenschaftsplattform Klimaschutz im zurückliegenden Jahr vorschlug (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: Phasenmodell mit möglichen Politikinstrumenten zur Governance verschiedener CO₂-Entnahmemethoden, vorgeschlagen von der Wissenschaftsplattform Klimaschutz¹¹³

113 Fuss et al. 2021, Abb. 8.

Handlungsfeld 21:

CCS – CO₂ in geologischen Lagerstätten einlagern

HF 21.1 Gesellschaftliche Diskussion zu CCS in die Wege leiten

Es ist eine gesellschaftliche Diskussion zur Akzeptanz von CCS erforderlich, mit dem Ziel, einen **Grundkonsens zur Rolle von CCS zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft** zu finden. Dies umfasst zunächst die Frage, ob und in welchem Umfang CCS in Deutschland umgesetzt werden soll und wo und welche Lagerstätten gesellschaftlich gewollt sind, zum Beispiel in Deutschland oder Europa, an Land oder unter dem Meer.

Während CCS vor einigen Jahren in erster Linie für CO₂ aus Kohle- oder Erdgaskraftwerken diskutiert wurde, stehen heute vor allem folgende **Einsatzgebiete** zur Diskussion:

- CO₂, das in für die Herstellung eines Produktes unerlässlichen chemischen Prozessen entsteht, beispielsweise in der Zementherstellung. Alternative Strategien, die auch ergänzend zum Einsatz kommen können, umfassen (i) die Reduktion des Bedarfs an dem Produkt, (ii) alternative, klimafreundlichere Herstellungswege des Produktes (zum Beispiel durch Reduzierung des Klinkerfaktors bei der Zementherstellung) und (iii) Substitution durch ein klimafreundlicheres Produkt (zum Beispiel Bauholz). Diese sind in Kosten, Entwicklungsgrad und Umsetzbarkeit zueinander abzuwägen. Beispielsweise ist zu berücksichtigen, dass ein Verzicht auf CCS in bestimmten Prozessen wie der Zementproduktion zu höheren Residualemissionen führen würde, die dann durch CDR ausgeglichen werden müssen.
- CO₂ aus Abfallverbrennung (hier ist gegebenenfalls begleitend eine Diskussion erforderlich, inwieweit Abfälle vermieden werden können).
- CDR für schwer vermeidbare Restemissionen unter anderem aus der Landwirtschaft (hier ist zu diskutieren, welche Restemissionen bis wann in welchen Bereichen toleriert werden sollen und welche Maßnahmen akzeptabel sind, um die Emissionen zu senken. Auch hier stellt sich die Frage nach Emissionssenkungen durch Nachfrageveränderung, zum Beispiel durch Umstellung auf eine stärker pflanzlich basierte Ernährung).
- zur langfristigen Erreichung globaler netto-negativer Emissionen, wie es für das 1,5°C-Ziel erforderlich ist (dies ist davon abhängig, wie schnell Emissionen in welchem Umfang reduziert werden sollen und können).¹¹⁴

¹¹⁴ Wie der Beitrag Deutschlands zu diesem globalen Ziel konkret aussehen soll, ist bisher politisch nicht festgelegt.

Klare und verbindliche gesetzliche Festlegungen können mögliche Befürchtungen in Bezug auf CCS entkräften. Hierzu gehören vor allem:

- Klare Vorgaben der zulässigen Einsatzgebiete von CCS, um sicherzustellen, dass CCS eine nachrangige Option darstellt und nicht beispielsweise die Nutzung von Kohle, Erdgas und Erdöl zur Energiegewinnung verlängert.
- Offen ist eine Klärung, wie Produkte, die im Ausland mit CCS erzeugt wurden, behandelt werden sollen (vor allem blauer Wasserstoff).

Bei allen potenziellen Lagerstätten ist zu prüfen, wie sichergestellt werden kann, dass eine Langzeitstabilität der Einlagerung von CO₂ gewährleistet ist, dass Risiken minimiert werden (Beeinträchtigung des Grundwassers, Erdbeben, Gefahren für Menschen und Tiere durch Leckagen) und dass Unregelmäßigkeiten über ein geeignetes Monitoring frühzeitig entdeckt werden. Demonstrationsprojekte könnten hierbei wichtige Erkenntnisse liefern und als praktische Anschauungsbeispiele dienen.

HF 21.2 Europaweite Speicher- und Transportinfrastruktur für CO₂ aufbauen

Eine grenzüberschreitende CO₂-Transportinfrastruktur ermöglicht die Nutzung der umfangreichen CO₂-Speicherstätten in Norwegen, den Niederlanden und in Großbritannien, die vor allem unter der Norwegischen See und der Nordsee große Potenziale fernab menschlicher Besiedlung bieten. Deutschland sollte sich auf EU-Ebene dafür einsetzen, **zügig einen europäischen Rechtsrahmen für die CO₂-Speicherung zu entwickeln**. Ein Schritt könnte sein, die Infrastrukturen für CO₂-Transport und -lagerung in die Leitlinien für die transeuropäische Energieinfrastruktur (TEN-E-Verordnung) einzubeziehen.

Der Aufbau der CO₂-Transportinfrastruktur sollte zügig begonnen werden. In der Mitteilung zu nachhaltigen Kohlenstoffkreisläufen aus Dezember 2021 hat die Europäische Kommission angekündigt, die Notwendigkeit einer europäischen CO₂-Infrastruktur zu untersuchen. Als Voraussetzung dafür ist ein **grenzüberschreitendes, systematisches Mapping** zwischen der zeitlichen Entwicklung von nicht vermeidbaren CO₂-Punktquellen (zum Beispiel Zementwerke), potenziellen DAC-Standorten und CO₂-Lagerstätten erforderlich.

Handlungsfeld 22:

CCU – Kohlenstoff klimaverträglich nutzen

Viele Produkte wie Kunststoffe, Medikamente und Düngemittel beinhalten Kohlenstoff. Heute stammt er meist aus Erdöl sowie Erdgas. Für eine klimaneutrale Produktion kommen Biomasse oder aus der Luft gewonnenes CO₂ als Kohlenstoffquellen infrage. Wird CO₂ genutzt, das ursprünglich aus fossilen Rohstoffen oder chemischen Prozessen wie der Zementherstellung stammt, ist die Gesamtkette nicht CO₂-neutral, da mit Ende der Produktlebenszeit das CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Die Nutzung von CO₂ (Carbon Capture and Usage – CCU) ist daher differenziert zu betrachten. Abhängig von der verwendeten CO₂-Quelle, der Dauerhaftigkeit der CO₂-Speicherung, der Substitution fossilbasierter Produkte und dem CO₂-Fußabdruck der Prozesskette kann CCU zum Klimaschutz beitragen, unter Umständen aber sogar zu höheren Emissionen führen.

HF 22.1 Anreize für CO₂-Entnahme setzen

Klimaschutzanreize in Form von Technologieförderung oder begünstigenden rechtlich-ökonomischen Rahmenbedingungen sollten längerfristig ausschließlich für die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre oder die Vermeidung von Emissionen, nicht aber für die Nutzung von CO₂ per se gesetzt werden. Denn Anreize für die Verwendung von CO₂ aus fossilen Quellen bergen das Risiko, dass sie auch die Prozesse, die das CO₂ produzieren, wirtschaftlich attraktiver machen und so dem Klimaschutz entgegenwirken. Maßnahmen zur Regulierung und Förderung von CCU sollten entsprechend sorgfältig auf dieses Risiko hin geprüft werden.

HF 22.2 Anrechnung langfristiger CO₂-Bindung in Relation zur Bindungsdauer ermöglichen

Um die erforderlichen Technologien zur Nutzung von abgeschiedenem CO₂ mit der benötigten hohen Geschwindigkeit zur Marktreife zu bringen, kann es für eine Übergangszeit dennoch sinnvoll sein, zunächst auch CCU mit der Nutzung fossilen Kohlenstoffs zu fördern. Die potenziellen Vorteile müssen in diesem Fall sorgfältig gegen das beschriebene Risiko abgewogen werden. Dabei sind die Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu betrachten. Neben dem gesamten Lebenszyklus der CCU-Produkte ist dabei auch zu berücksichtigen, welche Alternativen zur Verfügung stehen (beispielsweise Bauholz anstelle von CCU-Baustoffen und biogene Rohstoffe für die Industrie statt Power to Chemicals). Eine mögliche Maßnahme, um einer klimaschädlichen Anreizwirkung für die Verwendung fossilen Kohlenstoffs für CCU entgegenzuwirken wäre eine Besteuerung der Extraktion fossilen Kohlenstoffs.

Wird CO₂ langfristig in Produkten gebunden – beispielsweise Baumaterialien, die für mehrere Jahrzehnte in Verwendung bleiben –, kommt dies einem zeitlich begrenzten CDR-Effekt gleich. Hier könnte die CO₂-Entnahme in Form von Tonnenjahren (siehe Handlungsoption „Klare Regeln für das Accounting definieren“) angerechnet werden oder über einen von der Speicherdauer abhängenden Diskontfaktor nur zu einem gewissen Teil angerechnet werden.

Fazit

Die Folgen und Risiken der Erderwärmung sind von existenzieller Bedeutung für den Erhalt unserer Lebensgrundlagen und unseres Wohlstands. Die Vermeidung einer starken Erwärmung erfordert eine Transformation von sehr großem Umfang, welche nur durch das Zusammenwirken gesellschaftlicher, technischer und ökonomischer Lösungsoptionen zu bewältigen ist. Innerhalb von weniger als drei Dekaden soll der bisherige Trend kontinuierlich steigender globaler Treibhausgasemissionen derart in eine Emissionssenkung umgekehrt werden, dass zur Mitte des Jahrhunderts Netto-Null-Emissionen erreicht werden. Deutschland hat seine nationalen Treibhausgasemissionen in den vergangenen drei Jahrzehnten bereits um etwa vierzig Prozent gemindert. Um das gesetzte Ziel der Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, müssen die Anstrengungen allerdings deutlich gesteigert und auch die Transformation schwierig zu dekarbonisierender Sektoren und Prozesse umgesetzt werden. Hierzu zählen insbesondere die Industrie, der Gebäudesektor und der Verkehr. Die erforderlichen Maßnahmen umfassen eine signifikante Reduktion des Verbrauchs von Energiedienstleistungen, einen sehr effizienten Umgang mit Energie und Rohstoffen und einen umfassenden und raschen Ausbau der erneuerbaren Energien. Gleichzeitig ist eine Integration der Nachfragesektoren, von Energieinfrastrukturen und des Angebots erneuerbarer Energien durch eine umfassende Umsetzung der Sektorenkopplung von entscheidender Bedeutung.

Die hier vorgestellten 22 Handlungsfelder zeigen wichtige Lösungsoptionen und nehmen dabei eine ganzheitliche Perspektive auf die Herausforderungen ein. Als Grundlage hierfür dienen umfassende Metaanalysen der vorliegenden Literatur und eigene modellgestützte Szenarien. Die aufgeworfenen Handlungsfelder zeigen sowohl die Notwendigkeit auf, die Transformation des Energiesystems als gesamtgesellschaftlichen Prozess von globaler Dimension zu verstehen als auch die zentralen technologischen, ökonomischen und infrastrukturellen Voraussetzungen zeitnah zu schaffen. Die effiziente techno-ökonomische Ausgestaltung der Sektorenkopplung ist hierbei ebenso von zentraler Bedeutung wie die Adressierung sozio-ökonomischer Aspekte wie beispielsweise die Entwicklung neuer Mobilitätskonzepte und die Ausbildung von Fachkräften im Bereich der Energietechnologien.

Die systemanalytischen Betrachtungen verdeutlichen das sehr hohe Ambitionsniveau der Transformation. Nur durch eine Kombination aus Suffizienzmaßnahmen und starken Anstrengungen im Bereich der Energieeffizienz werden die erzielbaren Ausbauraten der erneuerbaren Energien und weiterer Technologien ausreichen, um Klimaneutralität erreichbar zu machen. Darüber hinaus werden für schwer vermeidbare Emissionen Optionen des Kohlenstoffmanagements erforderlich sein.

Es ist jedoch nicht in allen Bereichen offensichtlich, mit welchen Maßnahmen die jeweiligen Endsysteme erreicht werden können. Hierzu zählt beispielsweise die Frage, wie eine Steigerung der Sanierungsraten im Gebäudebestand oder der Umstieg

vom Individualverkehr zum öffentlichen Personenverkehr erreicht werden kann. Für diese Felder werden in gängigen Studien zur szenariobasierten Systemanalyse häufig ambitionierte Annahmen getroffen, die sich in der Praxis nur sehr schwierig realisieren lassen. Auch bei der Planung integrierter sektorenübergreifender Infrastrukturen sind noch viele Fragen offen. Wichtig ist es weiterhin, die soziale Dimension der Energiewende besser zu verstehen und die resultierenden Verteilungsfragen klima- und energiepolitischer Maßnahmen umfassend in der künftigen Forschung zu adressieren.

Da auch in der Vergangenheit gesetzte Ziele teilweise verfehlt wurden und einige Maßnahmen gegebenenfalls nicht genügen, um die Ziele zu erreichen, ist es unerlässlich, in allen Bereichen gleichzeitig Anreize zu setzen. Entsprechend darf eine stärkere Anstrengung zum Einsparen von Energie nicht dazu führen, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien weniger stark vorangetrieben wird. Eine öffentliche Diskussion über Kohlenstoffsinken und deren Planung sind unabdingbar, dürfen aber nicht die Anstrengungen bei Suffizienz, Effizienz oder Technologieausbau reduzieren.

Literatur

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-1

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.): *Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2017. URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/stellungnahme-sektorkopplung> [Stand: 05.01.2023].

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2017-2

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.): *Rohstoffe für die Energiewende: Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung*, (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), München, 2017. URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/stellungnahme-rohstoffe> [Stand: 05.01.2023].

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2019

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.): *Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung*, (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2019. URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/stellungnahme-bioenergie> [Stand: 05.01.2023].

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2020-1

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.): *CO₂ bepreisen, Energieträgerpreise reformieren. Wege zu einem sektorenübergreifenden Marktdesign*, (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), München, 2020. URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/stellungnahme-co2bepreisen> [Stand: 12.12.2022].

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2020-2

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.): *Zentrale und dezentrale Elemente im Energiesystem: Der richtige Mix für eine stabile und nachhaltige Versorgung*, (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2020. URL: [Stand: 05.01.2023].

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2021

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: *Resilienz digitalisierter Energiesysteme. Wie können Black-out-Risiken begrenzt werden?*, (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2021. URL: [Stand: 05.01.2023].

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2022-1

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.): *Welche Auswirkungen hat der Ukrainekrieg auf die Energiepreise und Versorgungssicherheit in Europa?* (Impuls des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“), 2022. URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/stellungnahme/energiepreise-versorgungssicherheit> [Stand: 05.01.2023].

acatech/Leopoldina/Akademienunion 2022-2

acatech—Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.): *Wie kann der Ausbau von Photovoltaik und Windenergie beschleunigt werden?* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2022. URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/stellungnahme/ausbau-photovoltaik-windenergie> [Stand: 05.01.2023].

Agora 2021

Agora Energiewende: *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*, Berlin, 2021. URL: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf [Stand: 10.10.2022].

Agora 2022

Müller, S./Peter, F./Saerbeck, B./Burmeister, H./Heilmann, F./Langenheld, A./Lenck, T./Metz, J.: *Energiesicherheit und Klimaschutz vereinen. Maßnahmen für den Weg aus der fossilen Energiekrise*, Agora energiewende, Berlin, 2022.

Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019

Agora Energiewende/Wuppertal Institut. *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*. Berlin, 2019.

Agora Industrie 2021

Agora Industrie (Hrsg.): *Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Aktualisierte Analyse zur Stahlbranche*, Berlin, 2021.

Agora Verkehrswende 2022

Markus L./Aichinger, W.: *Weniger Verkehr versuchen*, 2022. URL: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/weniger-verkehr-versuchen> [Stand: 22.02.2023].

Allam et al. 2020

Allam, Z./Moreno, C./Chabaud, D./Pratlong, F.: „Proximity-Based Planning and the 15-Minute City A Sustainable Model for the City of the Future“. In: *The Palgrave Handbook of Global Sustainability*, Cham: Springer International Publishing 2020, S. 1–20.

Ariadne 2021-1

Luderer, G./Kost, C./Sörgel, D *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 Szenarien und Pfade im Modellvergleich*: Potsdam Institute for Climate Impact Research 2021.

Ariadne 2021-2

Kopernikus-Projekt Ariadne: *Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie*. Ariadne-Kurzdosier, Potsdam, 2021.

Ariadne 2022

Kopernikus-Projekt Ariadne: *Regionale Steuerungsinstrumente im Stromsektor*. Ariadne-Analyse, Potsdam, 2021.

Ausfelder et al. 2017

Ausfelder, F./Drake, F.-D./Erlach, B./Fischedick, M./Henning, H.-M./Kost, C./Münch, W./Pittel, K./Rehtanz, C./Sauer, J./Schätzler, K./Stephanos, C./Themann, M./Umbach, E./Wagemann, K./Wagner, H.-J./Wagner, U.: *Sektor-kopplung Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), 2017.

BDI 2021

BDI/Boston Consulting Group: *Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*, Berlin, 2021.

Beckmann et al. 2022

Beckmann, K. J./Blumthaler, W./Holzapfel, H./Zebuhr, J.: *Ankommen statt unterwegs sein – Raum und Mobilität zusammen denken. Projekt Integrierte Stadtentwicklung und Mobilitätsplanung. Erster Zwischenbericht* (acatech Diskussion), München, 2022.

Bier et al. 2020

Bier, H./Gerber, H./Huber, M./Jungiger, H./Kray, D./Lange, J./Lerchenmüller, H./Nilsen, P. J.: *Mit Pflanzenkohle basierten Kohlenstoffsenken dem Klimawandel entgegenwirken*. EBI Whitepaper, Freiburg, 2020. URL: https://www.syncraft.at/files/pdf/RP-2020-EBI-Whitepaper_Pflanzenkohle2020-DE-final.pdf [Stand: 05.01.2023].

BMDV 2021

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV): *Mit der Elektrobahn klimaschonend in die Zukunft – Das Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes*, 2021. URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/sc-hiene-aktuell/elektrobahn-klimaschonend-zukunft-bahn-elektrifizierungsprogramm.html> [Stand: 07.10.2022].

BMWi 2021-1

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3*, 2021.

BMWi 2021-2

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Achter Monitoring-Bericht zur Energiewende 2020*, Berlin, 2021.

Circular Economy Initiative Deutschland et al. 2021

Circular Economy Initiative Deutschland/Hansen, E. G./Wiedemann, P./Klaus, F./Lüdeke-Freund, F./Jaeger-Erben, M./Schomerus, T./Alcayaga, A./Blomsma, F./Tischner, U./Ahle, U./Büchle, D./Denker, A.-K./Fiolka, K./Fröhling, M./Häge, A./Hoffmann, V./Kohl, H./Nitz, T./Schiller, C./Tauer, R./Vollkommer, D./Wilhelm, D./Zefferer, H./Akinci, S./Hofmann, F./Kobus, J./Kuhl, P./Lettgen, J./Rakowski, M./Wittken, R. von/Kadner, S.: *Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen*, 2021.

Costa et al. 2021

Costa, L./Moreau, V./Thurm, B./Yu, W./Clora, F./Baudry, G./Warmuth, H./Hezel, B./Seydewitz, T./Ranković: „The decarbonisation of Europe powered lifestyle changes“, In: *Environmental Research Letters*, 16, 4, 2021.

Creutzig et al. 2018

Creutzig, F./Roy, J./Lamb, W. F./Azevedo, I. M. L./Bruin de Bruin, W./Dalkmann, H./Edelenbosch, O. Y./Geels, F. W./Grubler, A./Hepburn, C./Hertwich, E. G./Khosla, R./Mattauch, L./Minx, J. C./Ramakrishnan, A./Rao, N. D./Steinberger, J. K./Tavoni, M./Ürge-Vorsatz, D./Weber, E. U.: „Towards demand-side solutions for mitigating climate change“. In: *Nature Climate Change*, 8, 4, 2018, S. 260–263.

Creutzig et al. 2022

Creutzig, F./Niamir, L./Bai, X./Callaghan, M./Cullen, J./Díaz-José, J./Figueroa, M./Grubler, A./Lamb, W. F./Leip, A./Masanet, E./Mata, É./Mattauch, L./Minx, J. C./Mirasgedis, S./Mulugetta, Y./Nugroho, S. B./Pathak, M./Perkins, P./Roy, J./La Rue Can, S. de/Saheb, Y./Some, S./Steg, L./Steinberger, J./Ürge-Vorsatz, D.: „Demand-side solutions to climate change mitigation consistent with high levels of well-being“. In: *Nature Climate Change*, 12, 1, 2022, S. 36–46.

D'Alessandro et al. 2020

D'Alessandro, S./Cieplinski, A./Distefano, T./Dittmer, K.: „Feasible alternatives to green growth“. In: *Nature Sustainability*, 3, 4, 2020, S. 329–335.

Dechema 2017

Bieringer, T./ Bramsiepe, C./ Brand, S./ Brodhagen, A./ Dreiser, C./ Fleischer-Trebes, C./ Kockmann, N./ Lier, S./ Schmalz, D./ Schwede, C./ Schweiger, A./ Stenger, F.: *Modulare Anlagen. Flexible chemische Produktion durch Modularisierung und Standardisierung – Status quo und zukünftige Trends*, Dechema, 2017.

dena 2021-1

Deutsche Energie-Agentur (dena)/Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln: *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 – Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems*, 2021.

dena 2021-2

Deutsche Energie-Agentur (dena): „dena-Gebäudereport 2022. Zahlen, Daten, Fakten“, 2021.

Department of Communications, Climate Action & Environment 2020

Department of Communications, Climate Action & Environment: *National Energy & Climate Plan 2021-2030*, 2020. URL: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-08/ie_final_necp_main_en_o.pdf.

DIW 2021

Fietze, D./Kröger, M./Müller, T./Neuhoff, K.: *Ein wirksames Klimaschutzgesetz braucht Frühindikatoren*, DIW Wochenbericht, 88, 2021, S. 679-687.

DIW 2022

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW): *Wie sicher ist die Energieversorgung ohne russisches Erdgas?* DIW aktuell Nr. 83, 2022.

Statistisches Bundesamt 2021

Statistisches Bundesamt: *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland. Indikatorenbericht 2021*, 2021. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/_publikationen-innen-nachhaltigkeit-indikatorenbericht.html [Stand: 19.01.2023].

Eerma et al. 2022

Erma, M. H./Manning, D./Økland, G. L./Rodriguez del Angel, C./Seifert, P. E./Winkler, J./Zamora-Blauermann, A./Zozmann, E./Hosseinioun, S. S./Göke, L./Kendzioriski, M./Von Hirschhausen, C.: „The potential of behavioral changes to achieve a fully renewable energy system - A case study for Germany“, In: *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 2, 2022.

Erlach et al. 2022

Erlach, B./Fuss, S./Geden, O./Glotzbach, U./Henning, H./Pittel, K./Renn, J./Rens, S./Sauer, D./Schmidt, C./Spiecker genannt Döhmann, I./Stemmler, C./Stephanos, C./Strefler, J.: *Was sind negative Emissionen, und warum brauchen wir sie?* „Kurz erklärt!“ des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“, 2022.

EU 2018

Europäische Union: *Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung)*, 2018.

Eurostat 2022

Eurostat: *Sustainable Development in the European Union: Monitoring Report on Progress Towards the SDGs in an EU Context*, Publications Office of the European Union, 2022.

European Commission 2022

European Commission, Directorate-General for Energy, Bagheri, M./Mandel, T./Fleiter, T. et al.: *Renewable space heating under the revised Renewable Energy Directive: ENER/C1/2018-494: description of the heat supply sectors of EU member states space heating market summary 2017*, 2022.

ERK 2022

Expertenrat für Klimafragen: *Zweijahresgutachten 2022. Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen (gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz)*, 2022.

Fishedick et. al 2014

Fishedick M./Roy J./Abdel-Aziz, A./Acquaye, A./Allwood, J. M./Ceron, J.-P./Geng, Y./Khesghi, H./Lanza, A./Perczyk, D./Price, L./Santalla, E./Sheinbaum, C./Tanaka, K.: *Industry*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Edenhofer, O./Pichs-Madruga, R./Sokona, Y./Farahani, E./Kadner, S./Seyboth, K./Adler, A./Baum, I./Brunner, S./Eickemeier, P./Kriemann, B./Savolainen, J./Schlömer, S./von Stechow, C./Zwicker T./Minx, J.C. (Hrsg.)). Cambridge University Press, Cambridge, UK und New York, NY, USA, 2014.

Fischer et al. 2013

Fischer, C./Grießhammer, R./Barth, R./Brohmann, B./Brunn, C./Heyen, D. A./Keimeyer, F./Wolff Franziska: *Mehr als nur weniger. Suffizienz: Begriff, Begründung und Potenziale*, (Öko-Institut Working Paper 2/2013), Freiburg, 2013.

Frehn et al. 2022

Frehn, D.-I. M./Diesfeld, D.-I. J./Schroeder-Schilling, M. L./Becker, B. S. N./Planersocietät Dr.-Ing. Frehn, Steinberg & Partner: *Modellvorhaben nachhaltige Stadtmobilität unter besonderer Berücksichtigung der Aufteilung des Straßenraums (MONASTA)*, Dessau-Roßlau 2022.

Fuel Cells and Hydrogen Observatory 2020

Fuel Cells and Hydrogen Observatory. *Hydrogen molecule market*. Chapter 2, 2020.

Fuss et al. 2021

Fuss, S./Gruner, F./Hilaire, J./Kalkuhl, M./Knapp, J./Lamb, W./Merfort, A./Meyer, H./Minx, J. C./Strefler, J.: *CO₂-Entnahmen: Notwendigkeit und Regulierungsoptionen. Studie im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz*, 2021.

FZJ 2021

Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ): *Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045*, (577), Jülich, 2021.

FZJ 2022

Forschungszentrum Jülich GmbH: *Wie sicher ist die Energieversorgung ohne russisches Erdgas? Daten, Fakten und Handlungsempfehlungen - Eine Analyse des IEK-3 am Forschungszentrum Jülich*. Institut für Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), Jülich, 2022.
URL: <https://www.fz-juelich.de/de/aktuelles/news/pressemitteilungen/2022/2022-03-17-importstopp-analyse> [Stand: 04.01.2023].

Greenpeace 2022

Greenpeace: *Kein Öl für Krieg. 10 Maßnahmen, wie Deutschland schnell unabhängiger von russischem Öl wird 2022*.

Grubler et al. 2018

Grubler, A./Wilson, C./Bento, N./Boza-Kiss, B./Krey, V./McCollum, D. L./Rao, N. D./Riahi, K./Rogeli, J./De Stercke, S./Cullen, J./Frank, S./Fricko, O./Guo, F./Gidden, M./Haylik, P./Huppermann, D./Kiesewetter, G./Rafai, P./Schoepp, W./Valin, H.: „A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies“, In: *Nature Energy*, 3, 2018, S. 515-527.

Hydrogen Council/Mc Kinsey & Company 2021

Hydrogen Council/Mc Kinsey & Company: *Hydrogen Insights*. A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness, 2021.

IPCC 2018

IPCC: „Annex I: Glossary“. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.): *Global Warming of 1.5°C*: Cambridge University Press 2018, S. 541-562.

IPCC 2022

Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.): *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA 2022.

Kenkmann et al. 2019

Kenkmann, T./Cludius, J./Fischer, C./Fries, T./Keimeyer, F./Schumacher, K./Brischke, D. L.-A./Leuser, L.: *Flächensparend Wohnen. Energieeinsparung durch Sufizienzpolitiken im Handlungsfeld „Wohnfläche“*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2019.

 Lemmer 2019

Lemmer, K.: *LEMMER, K. Neue autoMobilität II: Kooperativer Straßenverkehr und intelligente Verkehrssteuerung für die Mobilität der Zukunft (acatech STU-DIE)*, 2019.

NECP Belgien 2019

CONCERE-CNC PNEC 2030: *Belgian Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030*. Section A - National Plan, 2019.

NPM 2020-1

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: *Bedarfsge-rechte und wirtschaftliche öffentliche Ladeinfrastruktur. Plädoyer für ein dynamisches NPM-Modell*, Berlin, 2020.

NPM 2020-2

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 4: *Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes, Batteriezellproduktion, Rohstoffe und Recycling, Bildung und Qualifizierung: 1. Zwischenbericht zur strategischen Personalplanung und -entwicklung im Mobilitätssektor*, Berlin, 2020.

NPM 2021-1

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 4: *Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes, Batteriezellproduktion, Rohstoffe und Recycling, Bildung und Qualifizierung: Neue Impulse für Beschäftigung und Qualifizierung im Mobilitätssektor*. Bericht der Fokusgruppe Strategische Personalplanung und -entwicklung der AG 4, Berlin, 2021.

NPM 2021-2

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: *Mobilitätsbudget und digitalisiertes Parkraummanagement als Befähiger für inter- und multimodale Mobilität*. AG 3 – Sechster Zwischenbericht, Berlin, 2021.

Odenweller et al. 2022

Odenweller, A./George, J./Müller, V./Verpoort, P./Gast, L./Pfluger, B./Ueckerdt, F.: *Wasserstoff und die Energiekrise: fünf Knackpunkte*, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam, 2022.

OECD 2023

Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD): *P4. Non-renewable materials intensity over product lifetime*, 2023. URL: <https://www.oecd.org/innovation/green/toolkit/p4non-renewablematerialsintensityoverproductlifetime.htm> [Stand: 18.01.2023].

Offermann et al. 2022

Offermann, M./Lindner, S./Reiser, M./Braungardt, S./Bürger, V./Kocher, D./Bruse, M./Cramer, L.: *Nachhaltige Gebäudeklimatisierung in Europa. Konzepte zur Vermeidung von Hitzeinseln und für ein behagliches Raumklima*, (Climate Change 30/2022), Umweltbundesamt, 2022.

Öko-Institut 2022

Öko-Institut: *Arbeiten im Homeoffice – gut für die Umwelt und die Mitarbeiter:innen? Analyse der potenziellen ökologischen und sozialen Auswirkungen mobilen Arbeitens*, 2022. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/compan-e_Homeoffice.pdf [Stand: 10.10.2022].

Ragwitz/Weidlich 2023

Ragwitz, M./Weidlich, A.: *Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement*, (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München, i. E.

Sachverständigenrat für Umweltfragen 2022

Sachverständigenrat für Umweltfragen: *Wie viel CO₂ darf Deutschland maximal noch ausstoßen? Fragen und Antworten zum CO₂-Budget*. Stellungnahme, Berlin: SRU Juni 2022.

Schmelzer/Vetter 2019

Schmelzer, M./Vetter, A.: *Degrowth, Postwachstum zur Einführung*, Junius-Verlag, 2019.

Sensfuß et al. 2008

Sensfuß, F./Ragwitz, M./Genoese, M.: „The merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany“. In: *Energy Policy*, 36, 8, 2008, S. 3086–3094.

SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN UND FDP 2021

SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN UND FDP: *Koalitionsvertrag: Mehr Fortschritt wagen*. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, Berlin, 2021.

Staiß et al. 2022

Staiß, F./Adolf, J./Ausfelder, F./Erdmann, C./Fischedick, M./Hebling, C./Jordan, T./Klepper, G./Müller, T./Palkovits, R./Poganietz, W./Schill, W./Schmidt, M./Stephanos, C./Stöcker, P./Wagner, U./Westphal, K./Wurbs, S.: *Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Transportwege – Länderbewertungen – Realisierungserfordernisse*, 2022. (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft) URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/analyse/transportoptionen-wasserstoff-2030> [Stand: 05.01.2023].

Steger et al. 2022

Steger, S./Wilts, H./Bergs, L./Bergmann: *Energetische Sanierung von Bestandsgebäuden oder Neubau – Ökologische Bewertung hinsichtlich Materialbedarf, Primärenergieverbrauch und damit verbundenen Treibhausgas-Emissionen*. Wuppertal Institut, 2022.

Tong et al. 2019

Tong, D./Zhang, Q./Zheng, Y./Caldeira, K./Shearer, C./Hong, C./Qin, Y./Davis, S. J.: „Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target“. In: *Nature*, 572, 2019, S. 373–377.

UBA 2019

Umweltbundesamt: *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE – Studie* (Climate Change 36/2019), Dessau-Roßlau, 2019.

UBA 2021

Umweltbundesamt: *Umweltschädliche Subventionen in Deutschland*. Aktualisierte Ausgabe 2021, (Texte 143/2021), Dessau-Roßlau, 2021.

UBA 2022

UBA: *Kommunale, nicht-investive Maßnahmen im Verkehr*. Eine Beispielsammlung, 2022. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_oekologischeranalyseverkehr_web_bf.pdf [Stand: 10.10.2022].

Velten et al. 2021

Velten, E.K./Haase, I./Berghmans, N./Duwe, M./Evans, N.: *Measuring progress towards climate neutrality. Part I: Assessing structural change through net zero indicators*, Ecologic Institute, Berlin, Paris, 2021.

Vogel et al. 2021

Vogel, J./Steinberger, J. K./O'Neill, D. W./Lamb, W. F./Krishnakumar, J.: „Socio-economic conditions for satisfying human needs at low energy use: An international analysis of social provisioning“. In: *Global Environmental Change*, 69, 2021, S. 102287.

Wiese et al. 2022

Wiese, F./Thema, J./Cordroch, L.: „Strategies for climate neutrality. Lessons from a meta-analysis of German energy scenarios“. In: *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 2, 2022, S. 100015.

Wuppertal-Institut 2021

Wuppertal-Institut: *Gesellschaftliche Implikationen einer klimaneutralen Entwicklung. Begleitung des Querschnittmoduls Transformation. Gutachten im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität*, Berlin, 2021.

Bildrechte Icons



Cover
Abb.12 | S.103

Icon Illustration by Ellery Studio



Kap.7.2.2. | S.77

Icon Illustration by Ellery Studio

Das Akademienprojekt

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für eine faktenbasierte Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten rund 160 Expertinnen und Experten Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren Energieversorgung.

Die Arbeitsgruppe „Szenarien für eine klimaneutrale integrierte Energieversorgung und Produktion“

Die klimapolitischen Ziele wurden in Deutschland und Europa verschärft, eine globale Wasserstoffwirtschaft ist im Entstehen und Potenziale zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (negative Emissionen) sollen ausgelotet werden: Wie wirken sich diese Entwicklungen auf die Energiewende aus? Die AG Integrierte Energieversorgung untersucht, wie mögliche Wege in die Klimaneutralität vor 2050 unter diesen veränderten Vorzeichen aussehen können. Anhand eines Vergleichs aktueller Energieszenarien und eigener Modellrechnungen schafft sie einen Überblick über verschiedene mögliche Pfade zur Klimaneutralität und zeigt den Einfluss wichtiger technischer und ökonomischer Parameter und gesellschaftlicher Präferenzen auf die künftige Energieversorgung auf. Welche Treibhaus-Minderungspfade sind für die verschiedenen Sektoren nötig, um die deutschen und europäischen Klimaziele zu erreichen? Welche Technologien und Infrastrukturen müssen hierfür bis wann zur Verfügung stehen? Welche Rolle spielen Änderungen im Verbrauchsverhalten oder in der Energieeffizienz und welche politischen und regulatorischen Maßnahmen sind bis wann erforderlich, um diese Transformation zu schaffen?

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe wurden in zwei Formaten aufbereitet:

1. Das **Analysepapier** „Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement“ stellt die Annahmen und Ergebnisse der eigenen Modellrechnungen, die Auswertung aktueller Energieszenarien aus der Literatur sowie die von der Arbeitsgruppe daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen für mögliche Pfade zur Klimaneutralität ausführlich dar.
2. Die **Stellungnahme** „Wie wird Deutschland klimaneutral? Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement“ stellt die Ergebnisse in kompakter Form dar und zeigt Handlungsoptionen auf.

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Prof. Dr. Mario Ragwitz (AG-Leitung)	Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG
Prof. Dr. Anke Weidlich (AG-Leitung)	Albert-Ludwig-Universität Freiburg, Institut für nachhaltige technische Systeme (INATECH)
Dr. Dirk Biermann	50Hertz Transmission GmbH
Prof. Tom Brown	Technische Universität Berlin
Dr. Elisabeth Dütschke	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Prof. Dr. Manfred Fishedick	Wuppertal-Institut
Prof. Dr. Sabine Fuss	Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)
Dr. Oliver Geden	Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP)
Dr. Patrick Jochem	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Dr. Christoph Kost	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Prof. Dr. Gunnar Luderer	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Prof. Dr. Karsten Neuhoff	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW)
Prof. Dr. Kurt Wagemann	DECHEMA
Prof. Dr. Frauke Wiese	Uni Flensburg
Dr. Jenny Winkler	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Wissenschaftliche Referentinnen und Referenten

Julian Brandes	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Célia Burghardt	Albert-Ludwig-Universität Freiburg
Dr. Berit Erlach	Koordinierungsstelle ESYS acatech
Jörn Gierds	Koordinierungsstelle ESYS acatech
Ulrike Herrmann	Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG
Dr. Mirko Schäfer	Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) Universität Freiburg
Bastian Zachmann	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Lin Zheng	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Gutachterinnen und Gutachter

Prof. Dr. Felix Creutzig	Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)
Prof. Dr. Doris Fuchs	Universität Münster
Prof. Dr. Martin Wietschel	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Prof. Dr. Christoph Weber	Universität Duisburg-Essen

Institutionen und Gremien

Beteiligte Institutionen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Federführung)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Direktorium

Das Direktorium leitet die Projektarbeit und vertritt das Projekt nach außen.

Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer (Vorsitzender)	RWTH Aachen
Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Prof. Dr. Hans-Martin Henning	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Prof. Dr. Ellen Matthies	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Prof. Dr. Karen Pittel	ifo Institut
Prof. Dr. Jürgen Renn	Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte
Prof. Dr. Indra Spiecker genannt Döhmann	Goethe-Universität Frankfurt am Main

Kuratorium

Das Kuratorium verantwortet die strategische Ausrichtung der Projektarbeit.

Prof. Dr.-Ing. Jan Wörner	acatech Präsident
Prof. (ETHZ) Dr. Gerald Haug	Präsident Leopoldina
Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Christoph Marksches	Präsident Union der deutschen Akademien der Wissenschaften
Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl	Präsident Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz
Prof. Dr. Bärbel Friedrich	Altpräsidialmitglied Leopoldina
Prof. Dr. Andreas Löschel	Ruhr-Universität Bochum, Vorsitzender der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“
Prof. Dr. Robert Schlögl	Direktor Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt	Präsident RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung
Oda Keppler (Gast)	Ministerialdirigentin BMBF
Dr. Rodoula Tryfonidou (Gast)	Referatsleiterin Energieforschung BMWi

Projektkoordination

Dr. Cyril Stephanos

Leiter der Koordinierungsstelle „Energiesysteme der Zukunft“,
acatech**Rahmendaten****Projektlaufzeit**

03/2016 bis 12/2023

FinanzierungDas Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung
(Förderkennzeichen 03EDZ2016) gefördert.

Die Stellungnahme wurde am 10.01.2023 vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet.

*Die Akademien danken allen Autor*innen sowie den Gutachter*innen für ihre Beiträge.
Die Inhalte der Stellungnahme liegen in alleiniger Verantwortung der Akademien.*

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Deutsche Akademie der Naturforscher
Leopoldina e.V.
Nationale Akademie der Wissenschaften

acatech–Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e.V.

Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften e.V.

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: 0345 47239-867
Fax: 0345 47239-839
E-Mail: leopoldina@leopoldina.org

Karolinenplatz 4
80333 München
Tel.: 089 520309-0
Fax: 089 520309-9
E-Mail: info@acatech.de

Geschwister-Scholl-Straße 2
55131 Mainz
Tel.: 06131 218528-10
Fax: 06131 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Hauptstadtbüro:
Pariser Platz 4a
10117 Berlin

Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

ISBN: 978-3-8047-4423-3