



Leopoldina  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften



Februar 2023

Kurzfassung der Stellungnahme

# Wie wird Deutschland klimaneutral?

## Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 zweifelsfrei erforderlich, auch bei reduziertem Energieverbrauch.
5. Restemissionen müssen durch **CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre** ausgeglichen werden. Hierfür, ebenso wie für die Abscheidung unvermeidbarer Prozessemissionen in der Industrie, sollte die **geologische Speicherung von CO<sub>2</sub>** 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.<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>-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.

---

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>-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 **CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Bepreisung in allen Sektoren essenziell. Da CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 Sufizienzmaßnahmen, 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Preisen und Investitionssicherheit erhöhen

Die bisherige kostenlose Zuteilung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten an die Industrie birgt die Gefahr, dass sich die CO<sub>2</sub>-Preise teils nur unzureichend in den Produktionskosten niederschlagen. Da viele Unternehmen im globalen Wettbewerb stehen, muss allerdings das Ziel, CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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: CO<sub>2</sub>-Entnahmen sind erforderlich, ersetzen jedoch nicht die CO<sub>2</sub>-Vermeidung

Um unvermeidbare Emissionen auszugleichen und das Temperaturziel des Pariser Klimaschutzabkommens einzuhalten, wird es erforderlich sein, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entfernen. Die Strategie zur CO<sub>2</sub>-Entnahme sollte europäisch abgestimmt in eine übergeordnete Kohlenstoffmanagement-Strategie eingebettet werden, die zusätzlich die geologische Speicherung fossiler CO<sub>2</sub>-Emissionen (CCS), die nicht rechtzeitig im erforderlichen Maß heruntergefahren werden können, und die Nutzung von CO<sub>2</sub> (CCU) umfasst.

Hinsichtlich der Potenziale für die CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Entnahme verlassen und überall, wo eine Möglichkeit besteht, ist der CO<sub>2</sub>-Vermeidung Vorrang einzuräumen. Die CO<sub>2</sub>-Entnahme ersetzt somit nicht die Emissionsvermeidung.

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

#### HF 20: CDR – CO<sub>2</sub>-aus der Atmosphäre entfernen

Die Aussicht auf spätere CO<sub>2</sub>-Entnahme (CDR) darf nicht dazu verleiten, bei der Emissionsvermeidung zu wenig ambitioniert zu sein, denn die CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> wieder entweicht (zum Beispiel durch Waldbrände bei Aufforstung als CO<sub>2</sub>-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 – CO<sub>2</sub> in geologischen Lagerstätten einlagern

Vor einigen Jahren wurde CCS in erster Linie für CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> infrage. Bei der Nutzung von CO<sub>2</sub> aus fossilen Rohstoffen ist die Gesamtkette hingegen nicht CO<sub>2</sub>-neutral, da mit Ende der Produktlebenszeit das CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre gelangt. Unabhängig von der Kohlenstoffquelle spielt die Dauer der CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> per se.

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

## Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“

Die Stellungnahme „*Wie wird Deutschland klimaneutral? Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement*“ ist im Rahmen des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ entstanden. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten rund 160 Expertinnen und Experten Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren Energieversorgung.

## Mitglieder der Arbeitsgruppe „Szenarien für eine klimaneutrale integrierte Energieversorgung und Produktion“

**Mitglieder:** Prof. Dr. Mario Ragwitz (AG-Leiter, Fraunhofer IEG), Prof. Dr. Anke Weidlich (AG-Leitung, Albert-Ludwig-Universität Freiburg, INATECH), Dr. Dirk Biermann (50Hertz), Prof. Tom Brown (TU Berlin), Dr. Elisabeth Dütschke Fraunhofer-ISI), Prof. Dr. Manfred Fischedick (Wuppertal-Institut), Prof. Dr. Sabine Fuss (MCC), Dr. Oliver Geden (SWP), Dr. Patrick Jochem (DLR), Dr. Christoph Kost (Fraunhofer-ISE), Prof. Dr. Gunnar Luderer (PIK) Prof. Dr. Karsten Neuhoff (DIW), Prof. Dr. Kurt Wagemann (DECHEMA), Prof. Dr. Frauke Wiese (Uni Flensburg), Dr. Jenny Winkler (Fraunhofer-ISI)

**Wissenschaftliche Referentinnen und Referenten:** Julian Brandes (Fraunhofer-ISE), Célia Burghardt (Albert-Ludwig-Universität Freiburg), Dr. Berit Erlach (acatech), Jörn Gierds (acatech), Ulrike Herrmann (Fraunhofer-IEG), Dr. Mirko Schäfer (INATECH/ Universität Freiburg), Bastian Zachmann (Fraunhofer-Institu-ISI), Lin Zheng (Fraunhofer-Institut-ISI)

### Kontakt:

Dr. Cyril Stephanos

Leiter der Koordinierungsstelle „Energiesysteme der Zukunft“

Pariser Platz 4a, 10117 Berlin

Tel.: +49 30 206 30 96 - 0 | E-Mail: [stephanos@acatech.de](mailto:stephanos@acatech.de)

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.

Deutsche Akademie der Naturforscher  
Leopoldina e. V.

Nationale Akademie der  
Wissenschaften

Jägerberg 1

06108 Halle (Saale)

Tel.: 0345 47239-867

Fax: 0345 47239-839

E-Mail: [politikberatung@leopoldina.org](mailto:politikberatung@leopoldina.org)

Berliner Büro:  
Reinhardtstraße 14  
10117 Berlin

acatech – Deutsche Akademie  
der Technikwissenschaften e. V.

Geschäftsstelle München:

Karolinenplatz 4

80333 München

Tel.: 089 520309-0

Fax: 089 520309-9

E-Mail: [info@acatech.de](mailto:info@acatech.de)

Hauptstadtbüro:  
Pariser Platz 4a  
10117 Berlin

Union der deutschen Akademien  
der Wissenschaften e. V.

Geschwister-Scholl-Straße 2

55131 Mainz

Tel.: 06131 218528-10

Fax: 06131 218528-11

E-Mail: [info@akademienunion.de](mailto:info@akademienunion.de)

Berliner Büro:  
Jägerstraße 22/23  
10117 Berlin