

# Making Mission Possible

Zusammenfassung

Eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft erreichen

September 2020

Version 1.0



Energy  
Transitions  
Commission

# Making Mission Possible

## eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft erreichen

Die Energy Transitions Commission (ETC) ist ein Zusammenschluss global führender Akteure des gesamten Energiebereichs: Energieproduzenten, energieintensive Industrien, Anlagenlieferanten, Finanzakteure und Umwelt-NGOs. Unsere Mission ist es aufzuzeigen, wie eine globale Wirtschaft geschaffen werden kann, die es sowohl Entwicklungsländern ermöglicht, den Lebensstandard der Industrieländer zu erreichen, als auch sicherzustellen, dass die globale Erwärmung auf weit unter 2 °C und so nahe wie möglich auf 1,5 °C begrenzt wird. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Welt bis etwa Mitte des Jahrhunderts CO<sub>2</sub>-Neutralität erreichen.

Die ETC wird unter dem gemeinsamen Vorsitz von Lord Adair Turner und Dr. Ajay Mathur geleitet. Unsere Kommissionsmitglieder sind auf der nächsten Seite aufgeführt.

Der Bericht Making Mission Possible wurde von den Kommissionsmitgliedern mit Unterstützung des ETC-Sekretariats erarbeitet, das von SYSTEMIQ bereitgestellt wurde. Er vereint und baut auf früheren ETC-Publikationen auf, die in enger Abstimmung mit Hunderten von Experten aus Unternehmen, Brancheninitiativen, internationalen Organisationen, Nichtregierungsorganisationen und der Wissenschaft entwickelt wurden. Der Bericht stützt sich auf Analysen, die von Climate Policy Initiative, Copenhagen Economics, Material Economics, McKinsey & Company, dem Rocky Mountain Institute, dem Energy and Resources Institute, University Maritime Advisory Services, Vivid Economics und SYSTEMIQ für und in Zusammenarbeit mit der ETC durchgeführt wurden, und basiert zudem auf einer breiteren Literaturrecherche. Wir beziehen uns dabei insbesondere auf Analysen der International Energy Agency sowie von Bloomberg NEF. Wir danken unseren Wissenspartnern und Mitwirkenden herzlich für ihre Beiträge.

Dieser Bericht gibt die kollektive Sicht der Energy Transitions Commission wieder. Die Mitglieder der ETC unterstützen den allgemeinen Tenor der in diesem Bericht vorgebrachten Argumente, was jedoch nicht dahingehend verstanden werden sollte, dass sie jeder Erkenntnis bzw. Empfehlung zustimmen. Die Institutionen, denen die Kommissionsmitglieder angehören, wurden nicht darum gebeten, den Bericht formell zu billigen.

Die ETC-Mitglieder sind sich nicht nur darüber einig, dass es wichtig es ist, bis Mitte des Jahrhunderts CO<sub>2</sub>-Neutralität innerhalb der Energie- und Industriesysteme zu erreichen, sondern teilen auch eine gemeinsame Vision, wie dieser Wandel erzielt werden kann. Allein die Tatsache, dass dieses Einvernehmen zwischen Führungspersönlichkeiten von Unternehmen und Organisationen mit unterschiedlichen Perspektiven und Interessen im Hinblick auf Energiesysteme möglich ist, sollte den Entscheidungsträgern weltweit Zuversicht geben, simultan eine wachsende Weltwirtschaft und die Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C sicherstellen zu können, und dass viele der zentralen Maßnahmen zum Erreichen dieser Ziele bereits klar sind und unverzüglich umgesetzt werden können.

### Weitere Informationen finden Sie unter:

[www.energy-transitions.org](http://www.energy-transitions.org)  
[www.linkedin.com/company/energy-transitions-commission](https://www.linkedin.com/company/energy-transitions-commission)  
[www.twitter.com/ETC\\_energy](https://www.twitter.com/ETC_energy)

# Unsere Kommissare

**Herr Marco Alvera,**  
Geschäftsführer – SNAM

**Herr Thomas Thune Anderson,**  
Vorsitzender des Verwaltungsrats – Ørsted

**Herr Brian Aranha,**  
Leitender Vizepräsident, Leiter Strategie, CTO, F&E, CCM, Global Automotive, Kommunikation und Unternehmensverantwortung – ArcelorMittal

**Lord Gregory Barker,**  
Geschäftsführender Vorsitzender – EN+

**Herr Pierre-André de Chalendar,**  
Vorsitzender und Geschäftsführer – Saint Gobain

**Frau Marisa Drew,**  
Chief Sustainability Officer & Global Head Sustainability Strategy, Advisory and Finance – Credit Suisse

**Herr Dominic Emery,**  
Stabschef – BP

**Herr Stephen Fitzpatrick,**  
Gründer – Ovo Energy

**Herr Will Gardiner,**  
Geschäftsführer – DRAX

**Herr John Holland-Kaye,**  
Geschäftsführer – Flughafen Heathrow

**Herr Chad Holliday,**  
Vorsitzender – Royal Dutch Shell

**Herr Timothy Jarratt,**  
Stabschef – National Grid

**Herr Hubert Keller,**  
Geschäftsführender Gesellschafter – Lombard Odier

**Frau Zoe Knight,**  
Geschäftsführerin und Gruppenleiterin des HSBC Centre of Sustainable Finance – HSBC

**Herr Jules Kortenhorst,**  
Geschäftsführer – Rocky Mountain Institute

**Herr Mark Laabs,**  
Geschäftsführer – Modern Energy

**Herr Richard Lancaster,**  
Geschäftsführer – CLP

**Herr Li Zheng,**  
Geschäftsführender Vizepräsident – Institut für Klimawandel und nachhaltige Entwicklung, Tsinghua Universität

**Herr Martin Lindqvist,**  
Geschäftsführer – SSAB

**Herr Auke Lont,**  
Geschäftsführer und Präsident – Statnett

**Herr Johan Lundén,**  
Senior-Vizepräsident, Leiter des Büros für Projekt- und Produktstrategie – Volvo Group

**Dr. Ajay Mathur,**  
Generaldirektor – Institut für Energie und Ressourcen; Co-Vorsitzender – Kommission für Energiewende

**Dr. María Mendiluce,**  
Geschäftsführerin – We Mean Business

**Herr Jon Moore,**  
Geschäftsführer – BloombergNEF

**Herr Julian Mylchreest,**  
Geschäftsführender Direktor, Globaler Co-Leiter für natürliche Ressourcen (Energie, Strom und Bergbau) – Bank of America

**Frau Damilola Ogunbiyi,**  
Geschäftsführerin – Sustainable Energy For All

**Frau Nandita Parshad,**  
Geschäftsführende Direktorin, Sustainable Infrastructure Group – EBRD

**Herr Andreas Regnell,**  
Senior-Vizepräsident Strategische Entwicklung – Vattenfall

**Herr Carlos Sallé,**  
Senior-Vizepräsident für Energiepolitik und Klimawandel – Iberdrola

**Herr Siddharth Sharma,**  
Group Chief Sustainability Officer – Tata Sons Private Limited

**Herr Ian Simm,**  
Gründer und Geschäftsführer – Impax

**Herr Mahendra Singhi,**  
Geschäftsführer – Dalmia Cement (Bharat) Limited

**Dr. Andrew Steer,**  
Präsident und Geschäftsführer – World Resources Institute

**Lord Nicholas Stern,**  
IG Patel Professor für Wirtschaft und Regierung – Grantham Institut – LSE

**Dr. Günther Thallinger,**  
Mitglied des Vorstands – Allianz

**Herr Simon Thompson,**  
Vorsitzender – Rio Tinto

**Dr. Robert Trezona,**  
Leiter Cleantech – IP Group

**Herr Jean-Pascal Tricoire,**  
Vorsitzender und Geschäftsführer – Schneider Electric

**Frau Laurence Tubiana,**  
Geschäftsführerin – European Climate Foundation

**Lord Adair Turner,**  
Vorsitzender – Energy Transitions Commission

**Herr Huang Wensheng,**  
Vorsitzender des Verwaltungsrates – Sinopec Capital

**Senator Timothy E. Wirth,**  
Präsident Emeritus – Stiftung der Vereinten Nationen

**Herr Lei Zhang,**  
Geschäftsführer – Envision Group

**Dr. Zhao Changwen,**  
Generaldirektor Industrielle Wirtschaft – Entwicklungsforschungszentrum des Staatsrates

**Frau Cathy Zoi,**  
Präsidentin – EVgo

# Eine florierende emissionsfreie Wirtschaft bis Mitte des Jahrhunderts mit Mission Possible

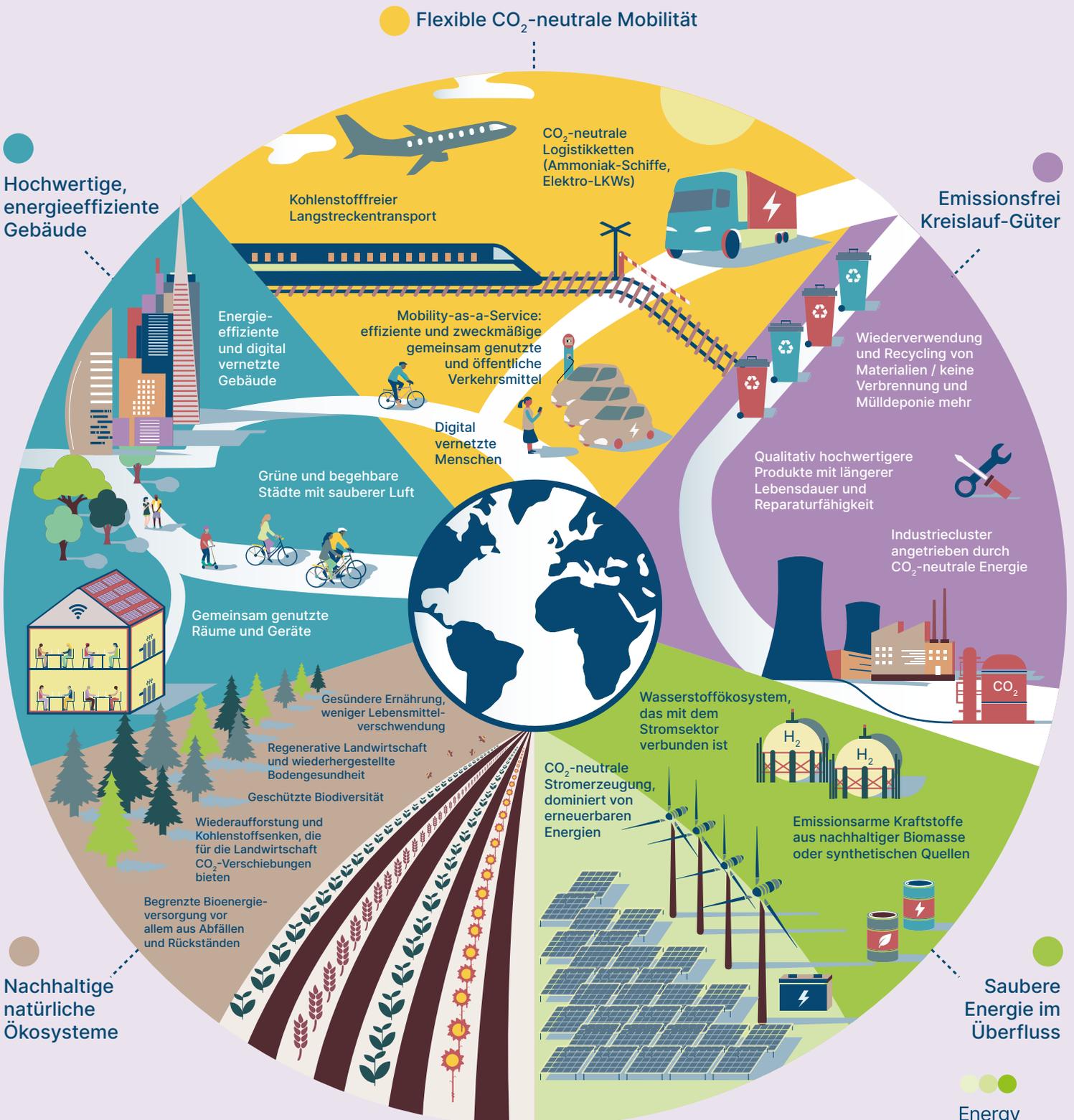
Hochwertige, energieeffiziente Gebäude

Flexible CO<sub>2</sub>-neutrale Mobilität

Emissionsfrei Kreislauf-Güter

Saubere Energie im Überfluss

Nachhaltige natürliche Ökosysteme



Die **Energy Transitions Commission (ETC)** ist ein Zusammenschluss global führender Akteure des gesamten Energiebereichs: Energieproduzenten, energieintensive Industrien, Anlagenlieferanten, Finanzakteure und Umwelt-NGOs. Unsere Mission ist es aufzuzeigen, wie eine globale Wirtschaft geschaffen werden kann, die es sowohl Entwicklungsländern ermöglicht, den Lebensstandard der Industrieländer zu erreichen, als auch sicherzustellen, dass die globale Erwärmung auf weit unter 2 °C und so nahe wie möglich auf 1,5 °C begrenzt wird. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Welt bis etwa Mitte des Jahrhunderts CO<sub>2</sub>-Neutralität erreichen.

Im Laufe der letzten vier Jahre hat die ETC mehrere Berichte veröffentlicht, die sich mit verschiedenen Dimensionen der Dekarbonisierung befassen und sich entweder auf bestimmte Sektoren konzentrieren (z. B. den Energiesektor in *Better Energy, Greater Prosperity*<sup>1</sup> und die schwer zu dekarbonisierenden Sektoren in *Mission Possible*<sup>2</sup>), oder die regionalen Herausforderungen und Chancen mittels unserer indischen und chinesischen Publikationen hervorheben.<sup>3</sup>

Die Gesamtschlussfolgerung dieser Berichte ist klar. **Es ist technisch und wirtschaftlich zweifellos möglich, bis etwa Mitte des Jahrhunderts CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen**, ohne sich auf die dauerhafte und signifikante Verwendung von Offsets durch Aufforstung, andere Formen der Landnutzungsänderung oder negative Emissionstechnologien zu verlassen:

- **Technisch:** Technologien und betriebswirtschaftliche Lösungen dafür sind entweder bereits verfügbar oder kurz vor der Markteinführung.
- **Wirtschaftlich:** Die Verringerung des konventionell gemessenen Lebensstandards im Jahr 2050 wird höchstens 0,5 % betragen und ist daher im Vergleich zu den enormen negativen Auswirkungen, die ein ungebremster Klimawandel bis 2050 haben würde, unerheblich.

CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen bedeutet eine **tiefgreifende Transformation unseres Energiesystems**. Die unverminderte Nutzung fossiler Brennstoffe – die derzeit mehr als 80 % des Primärenergiebedarfs ausmachen – muss schrittweise eingestellt werden, wobei sauberer Strom zum vorherrschenden Energieträger werden muss, ergänzt durch Wasserstoff, eine begrenzte Menge nachhaltiger Biomasse und die begrenzte Nutzung fossiler Brennstoffe, kombiniert mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung oder -Nutzung (CCS/U). Dies wird eine Verlagerung auf neue Produkte, Geschäftsmodelle und Konsummuster in allen Wirtschaftssektoren zur Folge haben und erfordert ein sorgfältiges Management der Auswirkungen auf Beschäftigung und Einkommen.

**Diese Neugestaltung des globalen Energiesystems wird wichtige Vorteile bringen.** Der Übergang zu CO<sub>2</sub>-Neutralität wird Innovation und Wirtschaftswachstum fördern und neue Arbeitsplätze schaffen. Er wird den Lebensstandard – insbesondere in Entwicklungsländern – durch geringere lokale Luftverschmutzung und die damit verbundenen gesundheitlichen Auswirkungen verbessern, die Energiekosten für die Haushalte senken, dank billigem Strom und effizienteren Gebäuden, flexiblere Mobilitätsdienste bieten und qualitativ hochwertigere, langlebiger Konsumgüter hervorbringen.

Dieser Bericht wird in einem noch nie dagewesenen Kontext veröffentlicht: Die COVID-19-Pandemie hat die Welt zum Stillstand gebracht, einen abrupten Rückgang des BIP und des internationalen Handels ausgelöst und die Vulnerabilität der Weltwirtschaft gegenüber systemischen Risiken gezeigt, trotz frühzeitiger Warnungen von Wissenschaftlern. Während die erste Priorität darin besteht, die Bevölkerung zu schützen und die Gesundheitssysteme mit Dringlichkeit zu stärken, erfordert diese Krise auch eine Reaktion im Hinblick auf die wirtschaftliche Erholung, die sich auf die Entwicklung einer widerstandsfähigeren Wirtschaft konzentriert. In diesem Zusammenhang bietet dieser Bericht Regierungen und Führungskräften des privaten Sektors eine Vision, wie sie in die Wirtschaft der Zukunft investieren und eine gesündere, **widerstandsfähigere, CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft** schaffen können. Darüber hinaus hat die ETC zwei Berichte veröffentlicht, in denen die spezifischen Maßnahmen aufgeführt sind, die Regierungen ergreifen können, um eine nachhaltige Erholung von der aktuellen Krise zu fördern.<sup>4</sup>

Im Wesentlichen ist die ETC davon überzeugt, dass die Industrieländer bis zum Jahr 2050 CO<sub>2</sub>-Neutralität erreichen sollten, und die Entwicklungsländer bis spätestens 2060. **Dieser Bericht erklärt, warum wir zuversichtlich sind, dass dies machbar ist, wie der Übergang erreicht werden kann und welche Schritte in den 2020er Jahren unternommen werden müssen, um die Welt auf den richtigen Weg zu bringen** – unter Einbeziehung der Erkenntnisse unserer früheren Publikationen und Aktualisierung unserer Analyse, um die neuesten Trends in Bezug auf die Bereitschaft und die Kosten wichtiger Technologien widerzuspiegeln. Er beschreibt folgende Punkte:



1. Energy Transitions Commission (2017), *Greater Energy – Better Prosperity*  
2. Energy Transitions Commission (2018), *Mission Possible*  
3. Energy Transitions Commission and Rocky Mountain Institute (2019), *China 2050: A Fully Developed Rich Zero-Carbon Economy* and Spencer, T. and Awasthy, A. (2019), *TERI, Analysing and Projecting Indian Electricity Demand to 2030*. Pachouri, R., Spencer, T., and Renjith, G., *TERI (2019), Exploring Electricity Supply-Mix Scenarios to 2030*, and Udetanshi, Pierpont, B., Khurana, S. and Nelson, D., *TERI (2019), Developing a roadmap to a flexible, low-carbon Indian electricity system: interim findings*  
4. ETC and Rocky Mountain Institute (2020), *Achieving a Green Recovery for China: Putting Zero-Carbon Electrification at the Core*; and ETC (2020), *7 Priorities to Help The Global Economy Recover*.

# CO<sub>2</sub>-neutrale Emissionen sind technisch und wirtschaftlich machbar



Technologien, die erforderlich sind, um jeden Sektor ohne Offsets vollständig zu dekarbonisieren, sind bekannt oder befinden sich in der Entwicklung.

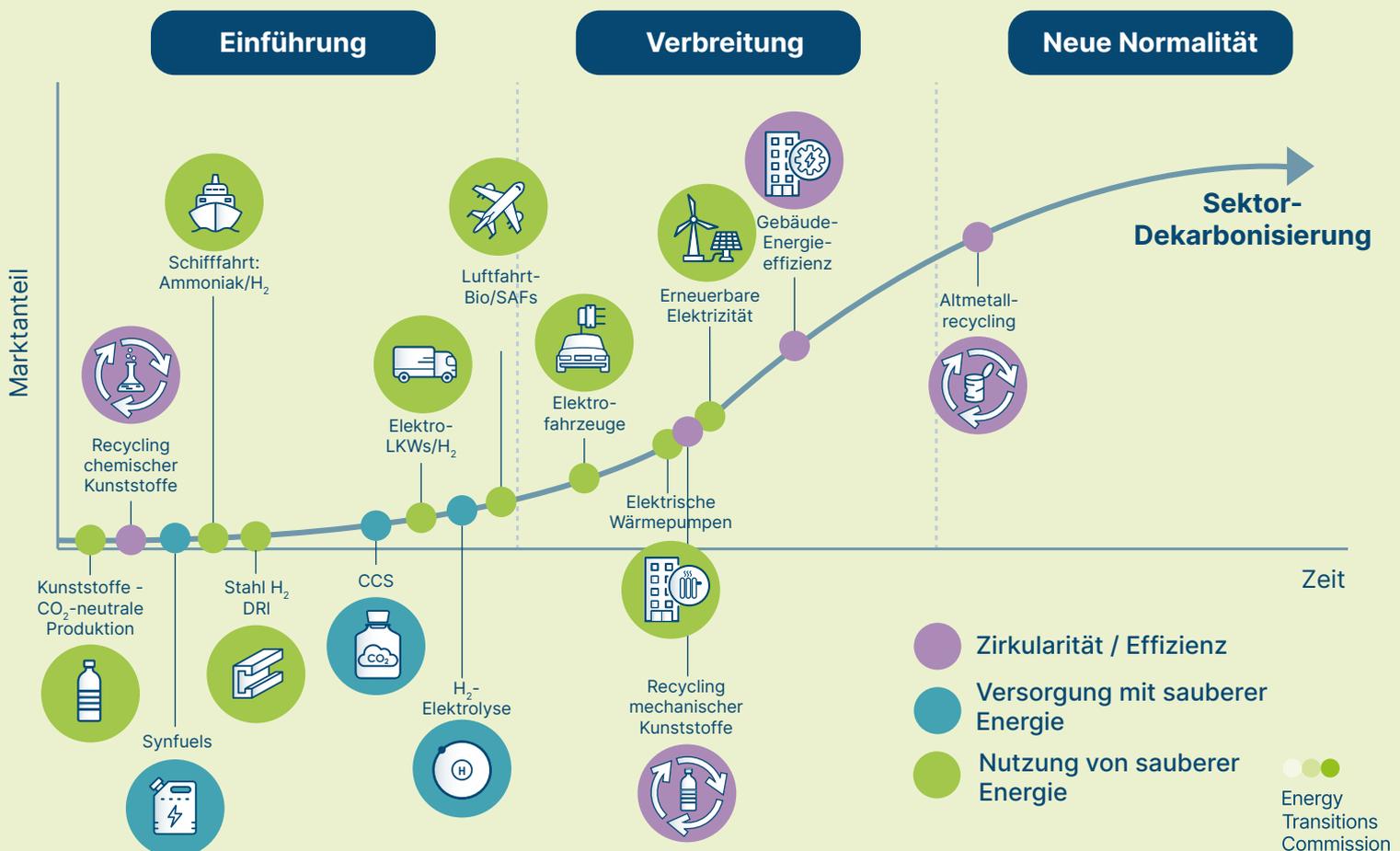


Die vollständige Dekarbonisierung wird weniger als 0,5 % des globalen BIP kosten

## 3 Schritte zu einer emissionsfreien Wirtschaft



## Der Weg der emissionsfreien Lösungen





# I. Eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft bis Mitte des Jahrhunderts ist Mission Possible: Drei Schritte zur Schaffung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft

Es ist technisch möglich, die Wirtschaft bis Mitte des Jahrhunderts zu dekarbonisieren, wobei die Gesamtkosten weniger als 0,5 % des globalen BIP betragen. Dazu sind drei Schritte erforderlich:

1

## Verminderter Energieverbrauch:

drastische Verbesserung der Energieproduktivität.

2

## Ausbau der Versorgung mit sauberer Energie:

Schaffung massiver Erzeugungskapazitäten für billigen sauberen Strom und CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequellen.

3

## Flächendeckende Verwendung sauberer Energie:

Dekarbonisierung der Energienutzung in allen Wirtschaftssektoren durch Umstellung auf neue Technologien und Prozesse, die saubere Energie anstelle unverminderter Mengen fossiler Brennstoffen nutzen (sauberer Strom, CO<sub>2</sub>-neutraler Wasserstoff, nachhaltige Bioenergie, strombasierte Brennstoffe und Kohlenstoffabscheidung).

## Verminderter Energieverbrauch

Es gibt viele Möglichkeiten, die Energieproduktivität zu verbessern, durch die wir Energieeinsätze in Güter und Dienstleistungen umwandeln, die das Wohlergehen verbessern, den Energieverbrauch senken und gleichzeitig den Lebensstandard aufrechterhalten oder sogar verbessern. Diese Möglichkeiten liegen in drei Bereichen [Abbildung A]:

- **Energieeffizienz:** Die technische Energieeffizienz lässt sich bei verschiedenen Anwendungen weiter verbessern, beispielsweise im Transportwesen (z. B. effizientere Flugzeuge), in der Industrie (z. B. geringere Energieeinsätze bei der traditionellen Hochofenstahlproduktion) und in Gebäuden (z. B. bessere Isolierung und höherer Leistungskoeffizient von Klimaanlage). In den Verkehrssektoren sind theoretisch Verbesserungen von bis zu 50 % möglich, während in der Industrie bescheidenere, aber immer noch signifikante Verbesserungen von 10 % bis 20 % erreicht werden könnten.
- **Materialeffizienz:** Es gibt viele Möglichkeiten, die Primärproduktion energieintensiver Materialien wie Stahl und Zement durch Produktumgestaltung, effizientere Materialnutzung und besseres Recycling und mehr Wiederverwendung zu verringern. Theoretisch könnten solche Maßnahmen die globalen Emissionen der Schwerindustrie um 40 % unter das „normale“ Niveau senken.
- **Dienstleistungseffizienz:** Und zuletzt ist es auch möglich, einen höheren Lebensstandard bei gleichzeitiger Nutzung weniger energieintensiver Güter und Dienstleistungen zu erreichen – beispielsweise durch bessere Stadtgestaltung oder gemeinschaftlich genutzte Modelle in Bezug auf den Transport. Hier hängt das Potenzial von Veränderungen des Verbraucherverhaltens ab und ist daher spekulativer. Aber grundsätzlich könnten erhebliche Verringerungen erzielt werden.

Das Ergreifen dieser Chancen erfordert wesentliche Änderungen an den Wertschöpfungsketten der Unternehmen (z. B. bei Produktdesign, Vertrieb und Recyclingprozessen) sowie bei Konsum- und Lifestyle-Entscheidungen (z. B. bei Stadtgestaltung und Mobilitätssystemen).

Die Gesamtmenge der letztendlich benötigten Energie, um einen hohen Lebensstandard zu unterstützen, wird auch stark davon beeinflusst werden, **inwieweit wir die wirtschaftlichen Aktivitäten** der einzelnen Wirtschaftssektoren **elektrifizieren** können. Dies spiegelt den inhärenten Effizienzvorteil von Strom in verschiedenen Anwendungen wider – insbesondere im Straßenverkehr und in der Gebäudeheizung.

Außerdem haben **digitale Technologien** das Potenzial, erheblich zu diesen Chancen beizutragen, indem sie sowohl Vorteile bei der Endnutzung als auch bei der Systemeffizienz bieten: Sie können die Reduzierung des Energieverbrauchs in vielen Bereichen erleichtern, vom Bau bis zur Fertigung (z. B. 3D-Druck, Gewichtsverringern); bessere Überwachung von und automatisierte Reaktionen auf Effizienzverluste in allen Sektoren (z. B. Überwachung der Energieeffizienz in der Industrie, Lastmanagement in der Logistik) und Verbesserung der Überwachung und des Managements des Energiebedarfs auf Ebene von Energiesystemen (z. B. Vehicle to Grid, Gebäudeheizungsmanagement).

Zusammengenommen ist das Potenzial, den Energiebedarf und damit auch die Kosten der Energiewende zu senken, beträchtlich: Der **Energiebedarf könnte bis Mitte des Jahrhunderts um bis zu 15 % niedriger sein als heute**, ohne die Verbesserung des Lebensstandards in den Entwicklungsländern zu beeinträchtigen. Wenn alle theoretisch verfügbaren Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieproduktivität genutzt würden, könnten die Investitionen, die zum Ausbau der Versorgung mit sauberer Energie erforderlich sind, erheblich reduziert werden. Insbesondere könnten die erforderlichen Investitionen für die Bereitstellung sauberen Stroms um 25% im Vergleich zu einem Fall mit begrenzter Verbesserung der Energieproduktivität gesenkt werden.

## Drei Dimensionen der Energieproduktivität



Abbildung A

QUELLE: SYSTEMIQ Analyse für die Energy Transitions Commission (2019), basierend auf „Material Economics (2018)“, „The Circular Economy: a Powerful Force for Climate Change“ (Die Kreislaufwirtschaft: eine mächtige Kraft für den Klimawandel)

## Ausbau der Versorgung mit sauberer Energie



Die Dekarbonisierung erfordert einen großen Wandel von kohlenstoffintensiven fossilen Brennstoffen zu sauberer Energie. **Die direkte Elektrifizierung wird der wichtigste Weg zur Dekarbonisierung sein**, da sie bei den meisten Anwendungen die billigste und energieeffizienteste Option ist. Deshalb **ist der Ausbau der CO<sub>2</sub>-neutralen Stromversorgung die wichtigste Priorität**. Bei einigen Anwendungen ist dies jedoch derzeit nicht praktikabel, während es bei anderen nicht kosteneffizient ist.

Daher sind für die vollständige Dekarbonisierung aller Wirtschaftssektoren **auch noch drei weitere Technologien** nötig:



**Wasserstoff** – ein Energieträger, der aufgrund seiner Energiedichte, Speicherfähigkeit und Eignung für sehr hohe Temperaturen bei einigen spezifischen Anwendungen der Elektrizität überlegen ist. Kohlenstoffarmer oder kohlenstofffreier Wasserstoff kann durch Elektrolyse („grüner Wasserstoff“) hergestellt oder aus Methan in Kombination mit CCS („blauer Wasserstoff“) gewonnen werden. Wasserstoff wiederum kann zur Herstellung von Brennstoffen auf Wasserstoffbasis (z. B. Ammoniak und synthetische Kraftstoffe (Synfuels)) verwendet werden.



**CCS** – die neben ihrer potenziellen Verwendung bei der Herstellung blauen Wasserstoffs auch bei verschiedenen industriellen Prozessen und in Wärmekraftwerken eingesetzt werden kann, die weiterhin eine flexible Stromversorgung im Rahmen von Stromversorgungssystemen mit vorwiegend erneuerbaren Energien bieten. Ihre kostengünstige Nutzung hängt von der Verfügbarkeit geeigneter und sicherer Speicherkapazitäten vor Ort ab.



**Biomasse** – die im Prinzip eine Vielzahl von Anwendungen bedienen kann, einschließlich Industrierwärme, Chemierohstoffe, flexible Stromversorgung durch Wärmekraftwerke und Transportkraftstoffe. Aber der gesamte Umfang ihrer Nutzung über alle Sektoren hinweg muss die potenziell begrenzte Zufuhr an tatsächlich nachhaltiger Biomasse widerspiegeln.<sup>5</sup>

Es ist nicht möglich, genau zu prognostizieren, wie der globale Energiemix in einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft aussehen wird. Aber alle praktikablen Szenarien für eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft umfassen eine **stark erweiterte Rolle für die direkte Stromnutzung** (auf 65 % bis 70 % des finalen Energiebedarfs, gegenüber 19 % heute) und **eine sehr deutliche Erweiterung der Rolle von Wasserstoff** (die weitere 15 % bis 20 % des finalen Energiebedarfs ausmacht, wobei ein zunehmender Anteil mittels Elektrolyse produziert wird).

Folglich muss die jährliche globale Stromversorgung um das Vier- bis Fünffache wachsen, um ~90-115.000 Terawattstunden (TWh) [Abbildung B] zu erreichen, wobei dieser gesamte Strom CO<sub>2</sub>-neutral produziert werden muss. Dies erfordert einen schnellen Ausbau der Investitionen in erneuerbare Energien: In den nächsten 30 Jahren wird das durchschnittliche jährliche Tempo der Steigerung der Wind- und Solarkapazität etwa das Fünf- bis Sechsfache des 2019 erreichten Anstiegs betragen müssen.

5. In diesem Bericht wird der Begriff „nachhaltige Biomasse“ verwendet, um Biomasse zu beschreiben, die produziert wird, ohne eine zerstörerische Landnutzungsänderung (insbesondere Entwaldung) auszulösen, die auf eine Weise angebaut und gewonnen wird, die ökologische Aspekte (wie Biodiversität und Bodengesundheit) berücksichtigt und einen Lebenszyklus-CO<sub>2</sub>-Fußabdruck hat, der mindestens 50 % geringer ist als jener der alternativen fossilen Brennstoffe (im Hinblick auf die Opportunitätskosten des Bodens sowie den Zeitpunkt der Kohlenstoffbindung und Kohlenstofffreisetzung spezifisch für jede Form von Bio-Rohstoff und Nutzung).

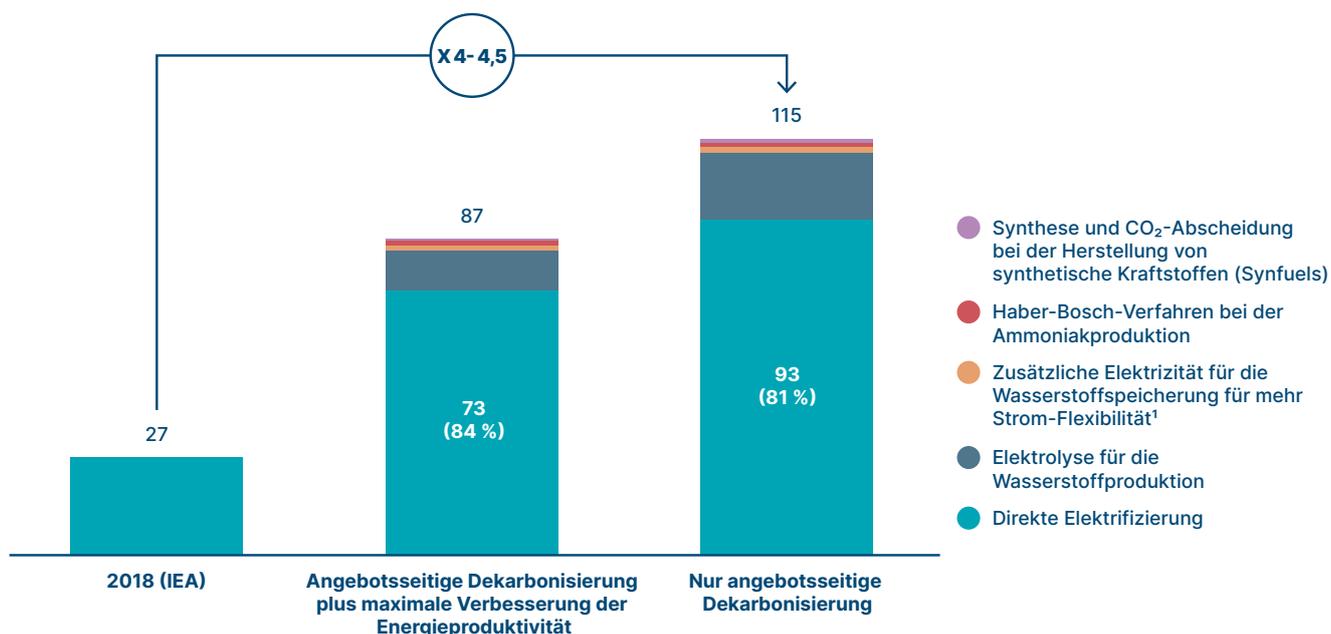
Dieser massive Einsatz CO<sub>2</sub>-neutraler Energie wird kostengünstig sein: In vielen Ländern liegen **die Kosten für Stromerzeugung mittels erneuerbarer Energien bereits unter den Gesamtkosten neuer Kohle- oder Gaskraftwerke und in einigen Fällen unter den Grenzkosten bestehender Wärmekraftwerke**. Und da die Kosten für erneuerbare Energien weiter sinken, wird ihr Kostenvorteil immer größer.

Die entscheidende Frage sind also nicht mehr die Kosten für die Erzeugung erneuerbarer Elektrizität, sondern die Kosten für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage in Systemen mit sehr hohem variablem erneuerbaren Angebot. Aber auch hier machen Technologie- und Kostentrends Lösungen immer rentabler:

- Der tägliche Bedarf an Flexibilität kann durch Batterien gedeckt werden, deren Kosten in den letzten Jahren gesunken sind und bis 2023 voraussichtlich 100 US-Dollar pro Kilowattstunde (kWh) betragen werden. Doch die Nachfragesteuerung – insbesondere über das optimale Timing der Elektrofahrzeugladung (EV) – könnte eine noch günstigere Lösung bieten.
- Die entscheidende Frage ist, wie in Ländern, in denen es große saisonale Schwankungen bei Angebot oder Nachfrage gibt, ein wöchentliches oder saisonales Gleichgewicht erreicht werden kann. Aber auch hier gibt es eine breite Palette möglicher Lösungen, einschließlich der saisonalen Energiespeicherung in Wasserstoff, abrufbarer Wasserkraft, einer fortgesetzten Rolle für Wärmekraftwerke (die nur einen geringen Teil der Jahresstunden betrieben und entweder durch die Anwendung von CCS/U zur Gaserzeugung oder Nutzung nachhaltiger Biomasse CO<sub>2</sub>-neutral gemacht werden) und des Potenzials, die Nachfrage sowohl von Haushalten als auch der Industrie über Zeit oder Standorte hinweg zu verlagern.

## In einer CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft muss die Bruttostromerzeugung bis 2050 ~90.000 bis ~115.000 TWh/Jahr erreichen

Der bis 2050 erzeugte Gesamtstrom gemäß den vorgegebenen Bahnen der ETC  
000 TWh/Jahr



<sup>1</sup>Die Zusätzliche Elektrizität für die Wasserstoffspeicherung für mehr Strom-Flexibilität deckt nur den Stromverlust, der aufgrund der Umwandlung in Wasserstoff und zurück in Elektrizität entsteht.

QUELLE: SYSTEMIQ Analyse für die Energy Transitions Commission (2020), IEA (2019), World Energy Outlook (Perspektive für die weltweite Energie)

Unsere aktualisierte Analyse zeigt daher, dass spätestens Mitte der 2030er Jahre Stromsysteme, die zu 85 % von variablen erneuerbaren Energien abhängig sind, **zu All-in-Kosten** betrieben werden können (einschließlich aller erforderlichen Ressourcen für Backup, Speicherung und Flexibilität). Diese werden an vielen Standorten stark wettbewerbsfähig mit fossilen Brennstoffen sein und an einigen Standorten sogar erheblich billiger als diese [Abbildung C].

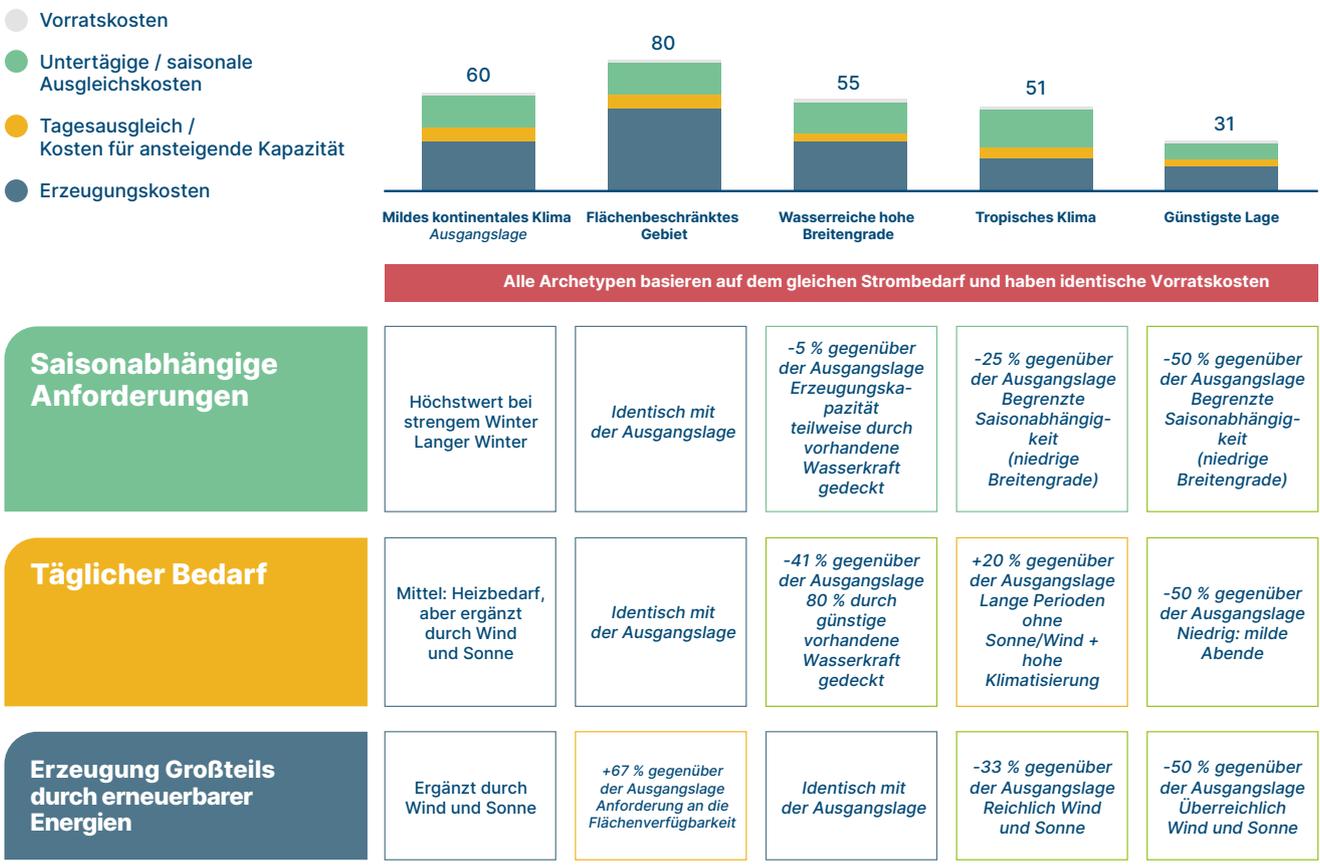
Neben der dominanten Rolle des CO<sub>2</sub>-neutralen Stroms ist es jedoch auch wichtig, die drei anderen Technologien in einem stark erhöhten Maß auszubauen. Die Schaffung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft bis Mitte des Jahrhunderts erfordert eine drastische Beschleunigung des Investitionstempos:

- Die jährliche **Gesamtwasserstoffproduktion muss von heute etwa 60 Millionen Tonnen (Mt) auf 500 bis 800 Mt** bis Mitte des Jahrhunderts steigen, um die Nachfrage nach Wasserstoff, Ammoniak und Synfuels in Endnutzeranwendungen zu decken.
- Etwa **6 bis 9,5 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr an CCS/U** werden benötigt, um die verbleibende Nutzung fossiler Brennstoffe nahezu CO<sub>2</sub>-neutral zu machen, insbesondere in der Schwerindustrie (~40 % der Gesamtmenge), der Wasserstoffproduktion aus Methan (~30 % der Gesamtmenge) und der Spitzenstromerzeugung (~20 % der Gesamtmenge).
- **46 bis 69 Exajoule Energie müssen aus Bio-Rohstoffen gewonnen werden**, die alle auf eine Art bereitgestellt werden müssen, die einen geringen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck hat und nachhaltig ist, primär aus Restbiomasse.

Insgesamt besteht kein Zweifel daran, dass die Welt über ausreichende natürliche Ressourcen verfügt, um den Übergang zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft zu ermöglichen. Es gibt genügend Land-, Mineral- und Wasserressourcen, um das massive Wachstum zu unterstützen, das bei der Erzeugung von grünem Strom und grünem Wasserstoff erforderlich ist. Eine angemessene Kohlenstoffspeicherkapazität ist global vermutlich ebenfalls verfügbar, jedoch mit großen regionalen Unterschieden. **Die größte Unsicherheit bezieht sich auf die Größenordnung wirklich nachhaltiger, kohlenstoffarmer Bio-Ressourcen.** Wenn die Nutzung von Bio-Ressourcen begrenzt ist, wird dies die Abhängigkeit von Strom, Wasserstoff und CCS erhöhen und es unverzichtbar machen, die Nutzung nachhaltiger Biomasse bei jenen Anwendungen zu priorisieren, bei denen Alternativen am wenigsten verfügbar sind.

## Je nach Klimamuster, natürlichen Ressourcen und der vorhandenen Strom-Flexibilität werden die lokalen Kosten für kohlenstoffarmen Strom voneinander abweichen

Maximale Gesamtkosten der Stromerzeugung in einem nahezu vollständig variablen Stromversorgungssystem mit erneuerbaren Energien bis 2035  
 US\$/MWh, Aufschlüsselung nach Flexibilitätsdiensten



QUELLE: Angepasst an die Climate Policy Initiative (Klimapolitikinitiative) für die Energy Transitions Commission (2017), *Low-cost, low-carbon power systems* (Kostengünstige, kohlenstoffarme Stromsysteme)

## Flächendeckende Verwendung sauberer Energie

Die oben beschriebenen vier Arten sauberer Energie werden es technisch möglich machen, bis Mitte des Jahrhunderts in allen Wirtschaftssektoren CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen, mit der potenziellen Ausnahme der Landwirtschaft. In vielen Sektoren wird die direkte Elektrifizierung aufgrund ihrer inhärenten Effizienz dominieren. In anderen Bereichen – insbesondere in der Industrie und im Gebäudebereich – gibt es ein Lösungsportfolio, und der geeignete Weg zur Dekarbonisierung wird je nach Region variieren, abhängig von den lokal verfügbaren Ressourcen und deren Preisen:



**Bereits elektrifizierte Sektoren** – wie Haushaltsgeräte, Beleuchtung, Kühlung, Wasserheizung, Computer, Maschinenbewegung in der Fertigung und auf der Schiene – müssen lediglich sicherstellen, dass der verwendete Strom CO<sub>2</sub>-neutral ist.



**Der Landtransport** wird wahrscheinlich weit vor 2050, entweder mit Batterien oder Wasserstoff-Brennstoffzellen, elektrisch werden und wesentlich schneller als viele Prognosen vermuten lassen. Dies ist auf den inhärenten Energieeffizienzvorteil von Elektromotoren zurückzuführen. Bei leichten Nutzfahrzeugen ist es wahrscheinlich, dass sogar die Investitionskosten für den Kauf von Elektroautos (EV) bis Mitte der 2020er Jahre unter jene für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICE) fallen werden. Bei mittelschweren und schweren Nutzfahrzeugen wird die Dekarbonisierung wahrscheinlich entweder eine batteriegestützte Elektrifizierung oder den Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen mit sich bringen, wobei ersteres für kürzere innerstädtische Anwendungen dominiert und letzteres für weitere Strecken geeignet ist.



**In der Schifffahrt und im Luftverkehrssektor** werden batteriegestützte Elektrifizierung und Wasserstoff bei Kurzstrecken ebenfalls eine wichtige Rolle spielen. Aber die begrenzte Energiedichte von Batterien und die geringe volumetrische Dichte von Wasserstoff könnten den Einsatz von flüssigen Brennstoffen für lange Strecken auf absehbare Zeit notwendig machen. Diese Brennstoffe könnten entweder aus kohlenstoffarmen, nachhaltigen Bio-Rohstoffen (z. B. Alkohole, Biokraftstoffe) oder der Power-to-Liquid-Produktion (Ammoniak im Falle der Schifffahrt und Synfuels in der Luftfahrt) stammen.



**In der Schwerindustrie** – Stahl, Zement, Chemikalien und Aluminium – kann eine Kombination aus saubereren Energiequellen und Kohlenstoffabscheidung sowohl energiebasierte Emissionen als auch Emissionen aus den chemischen Prozessen selbst eliminieren. Die kostengünstigste Option wird vermutlich je nach Region und je nach Altlasten und Neuansiedlungen der einzelnen Standorte variieren.

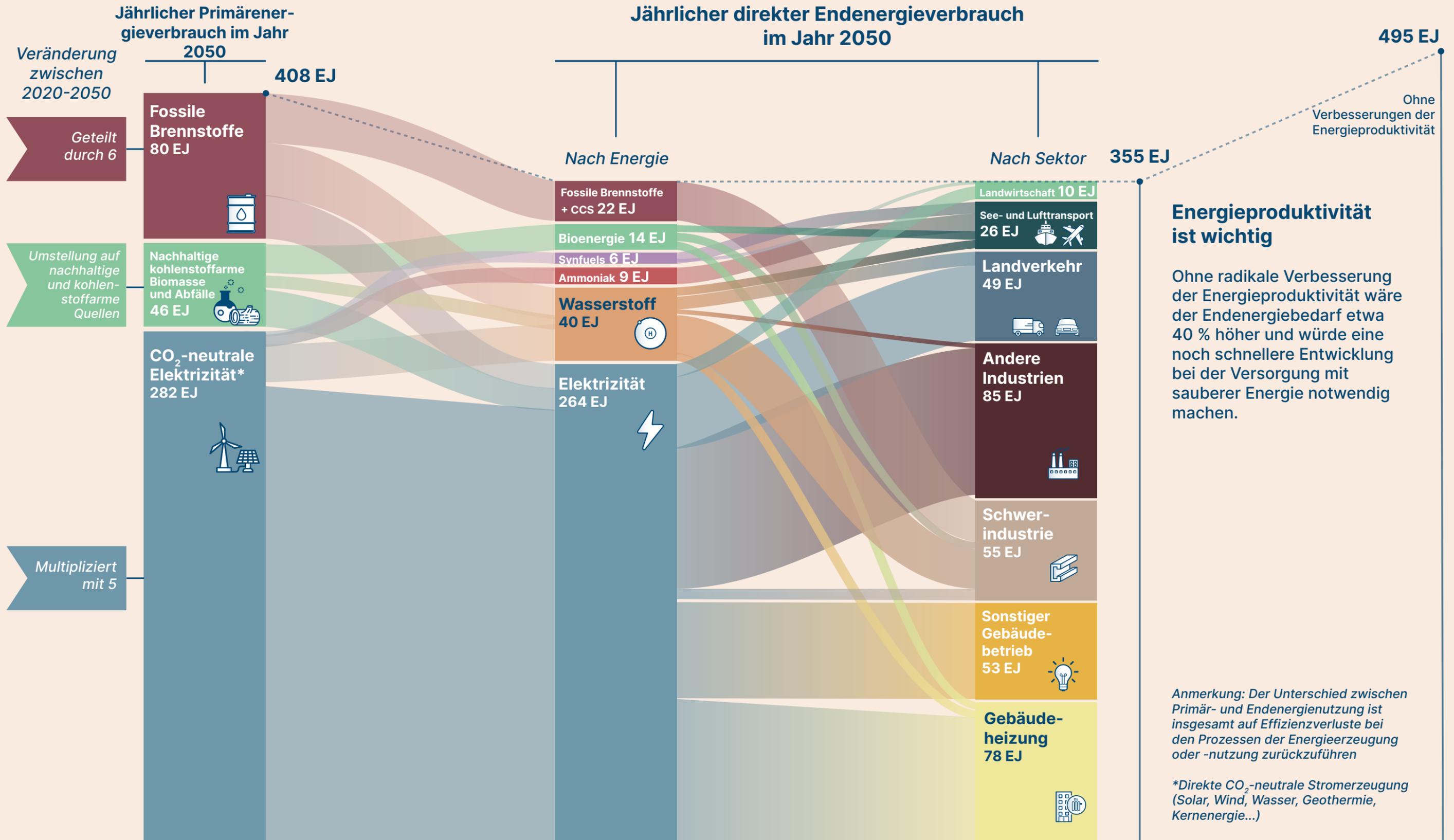


**Die Beheizung von Wohn- und Gewerbegebäuden** ist in vielen Regionen bereits elektrifiziert und könnte durch den Einsatz elektrischer Wärmepumpen oder elektrischer Widerstandsheizungen weiter elektrifiziert werden. Alternativen sind die Verbrennung von Wasserstoff oder Biomethan unter Verwendung bestehender Ferngasnetze und Fernwärmesysteme. Die optimale Lösung variiert je nach Region, je nach Ressourcenverfügbarkeit und vorhandener Infrastruktur. Eine bessere Isolierung von Gebäuden ist besonders wichtig, um die Spitzennachfrage zu reduzieren und diese Brennstoffumstellung – insbesondere bei strombasierten Optionen – aus Sicht der Energiesysteme kontrollierbarer zu machen.



In der Landwirtschaft können Emissionen aus fossilen Brennstoffen durch saubere Elektrifizierung oder den Einsatz von E-Brennstoffen eliminiert werden. Allerdings werden Distickstoffoxid- und Methanemissionen aus landwirtschaftlichen Prozessen schwieriger zu beseitigen sein. Einige angebotsseitige Technologien könnten dazu beitragen, diese Emissionen zu reduzieren – insbesondere Veränderungen der landwirtschaftlichen Praktiken. Allerdings werden jedoch wahrscheinlich auch größere Veränderungen in Bezug auf die Ernährung notwendig sein.

# Um eine emissionsfreie Wirtschaft zu fördern, ist eine vollständige Umstellung unseres Energiesystems notwendig



# Auswirkungen auf die Nutzung fossiler Brennstoffe

Infolge dieser Veränderungen wird die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen dramatisch sinken [Abbildung D]:



Die Nutzung von **Kraftwerkskohle** wird schrittweise nahezu vollständig eingestellt werden, mit Ausnahme von Koks Kohle in Kombination mit CCS in der Stahlproduktion und einer möglichen Rolle bei der Herstellung chemischer Rohstoffe.



**Die Ölnachfrage** könnte von 100 Millionen Barrel pro Tag im Jahr 2019 auf rund 10 Millionen Barrel pro Tag bis Mitte des Jahrhunderts reduziert werden, wobei eine verbleibende Rolle als Rohstoff für die Kunststoffherstellung verbleibt.

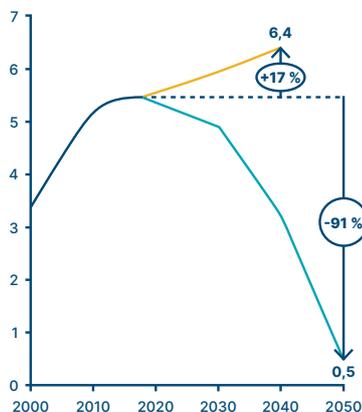


**Erdgas** wird in vielen Sektoren und an vielen Standorten eine Übergangsrolle spielen. Die Nachfrage könnte jedoch bis Mitte des Jahrhunderts um ~30 % bis 57 % zurückgehen. In der Übergangsphase sollte seine optimale Rolle die erheblichen Klimaauswirkungen durch das Austreten von Methan in der Erdgasversorgungskette widerspiegeln und die dringende Notwendigkeit, einen darauf folgenden Weg zur Dekarbonisierung, entweder durch die Nachrüstung von CCS/U oder die Umstellung auf ein anderes „grünes Gas“ wie Biomethan oder Wasserstoff, sicherzustellen.

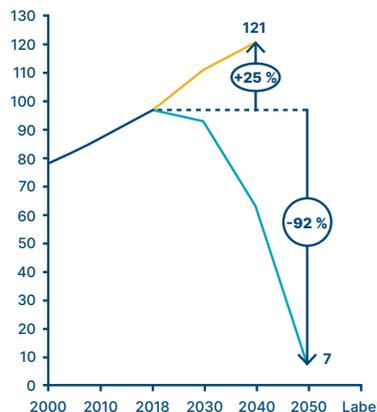
## Auswirkungen der Dekarbonisierung-Neutralität auf die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen

— ETC-Szenario – angebotsseitige Dekarbonisierung — IEA Aktuelles Richtlinien-Szenario

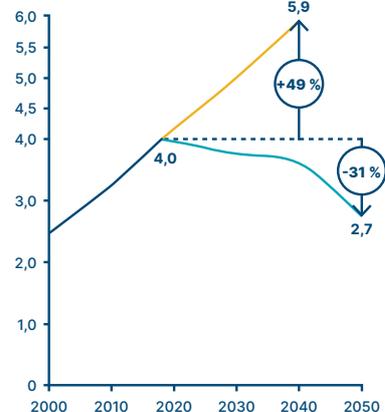
**Kohleverbrauch**  
Milliarden Tonnen pro Jahr



**Ölverbrauch**  
Millionen Barrel pro Tag



**Erdgasverbrauch**  
000 Milliarden Kubikmeter pro Jahr



**ANMERKUNG:** Die Werte der ETC-Szenarien für 2030 und 2040 basieren auf dem Central Scenario aus dem Dokument „Copenhagen Economics“ (Referenz nachstehend)

**QUELLE:** SYSTEMIQ Analyse für die Energy Transitions Commission (2020), IEA (2019), World Energy Outlook, Copenhagen Economics (2017), The future of fossil fuels: (Die Zukunft fossiler Brennstoffe:) How to steer fossil fuel use in a transition to a low-carbon energy system (Wie die Nutzung fossiler Brennstoffe beim Übergang zu einem kohlenstoffarmen Energiesystem gesteuert werden kann)

## Auswirkungen auf die Verwendung von Offsets und naturbasierten Lösungen

Viele Modelle dazu, wie Dekarbonisierung erreicht werden kann, räumen „Offsets“ eine gewisse Rolle ein. Diese könnten aus drei Schlüsselquellen stammen: Emissionsgutschriften aus anderen kohlenstoffemittierenden Wirtschaftssektoren, Technologien für negative Emissionen (Bioenergie kombiniert mit CCS oder direkte Luftabscheidung kombiniert mit CCS) und Änderungen der Landnutzung, die zu geringeren Emissionen führen (z. B. Wiederaufforstung).

Die **Verfügbarkeit** von Offsets dürfte jedoch langfristig sinken:

- Das **Potenzial für Emissionsgutschriften aus anderen Sektoren wird natürlich abnehmen**, wenn sich die Dekarbonisierung der Wirtschaft beschleunigt.
- **Naturbasierte Lösungen können keinen permanenten Fluss negativer Emissionen ermöglichen**, da alle natürlichen Ökosysteme nach der Aufbauzeit (30 bis 40 Jahre für die Wiederaufforstung) letztlich zu einem CO<sub>2</sub>-neutralen Gleichgewicht von Emissionen und Absorption tendieren. Darüber hinaus kann die Kohlenstoffbindung je nach Art, anfällig für klimatische und natürliche Ereignisse sein.

In diesem Zusammenhang ist der Standpunkt der ETC wie folgt:

- Alle Wirtschaftssektoren (außer der Landwirtschaft) können und sollten bis Mitte des Jahrhunderts „echte CO<sub>2</sub>-Neutralität“ erzielen, mit einer Rolle für CCS/U, aber **keiner dauerhaften und wesentlichen Rolle für den Kauf von Emissionsgutschriften aus anderen Sektoren oder für Offsets aus naturbasierten Lösungen**.
- **Naturbasierte Lösungen könnten für eine sehr große einmalige Erhöhung des Kohlenstoffbestands** im terrestrischen Ökosystem (und eine entsprechende Verringerung der atmosphärischen THG-Konzentrationen) **sorgen** und der Kauf von Offsets könnte eine positive Rolle bei der Finanzierung dieser Bemühungen in den frühen Phasen des Übergangs spielen, vorausgesetzt, dass:
  - Sie **zusätzlich** und nicht anstatt schnellstmöglicher Fortschritte in Richtung „echte CO<sub>2</sub>-Neutralität“ innerhalb des Sektor zum Einsatz kommen.
  - Ihr angenommener CO<sub>2</sub>-Reduktionswert die Tatsache berücksichtigt, dass **der Zeitpunkt der CO<sub>2</sub>-Emissionssenkung wichtig ist**. In einer Welt, in der hohe Emissionen das Klima über gefährliche Umkipppunkte hinaus bringen könnten, ist eine Tonne Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), die über viele Jahre Waldwachstum absorbiert wird, nicht so wertvoll wie eine Tonne CO<sub>2</sub>, die durch Sekturmaßnahmen sofort eingespart wird.
  - Es werden robuste Systeme zur Zertifizierung der Qualität naturbasierter Lösungen eingesetzt.
- **Für naturbasierte Lösungen und andere Technologien zur Kohlenstoffabscheidung**, wie die direkte Luftabscheidung plus CCS oder Bioenergie plus CCS, wird nach 2050 für einige Jahre eine **fortdauernde, wenn auch relativ geringe Rolle** erforderlich sein. Dies wird für **jährliche Offsets von 2 bis 4 Gt CO<sub>2</sub> an Restemissionen** aus dem Agrarsektor (1 bis 2 Gt) sowie aus Energie- und Industriesektoren (1 bis 3 Gt, aufgrund der Tatsache, dass CCS-Prozesse keine 100 %ige CO<sub>2</sub>-Abscheidung erreichen) nötig sein.

## II. Kosten, Investitionen und die damit verbundenen Herausforderungen des Übergangs zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft

Sobald eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft erreicht ist, wird die Verringerung des konventionell gemessenen Lebensstandards 2050 sowohl in Industrieländern als auch in Entwicklungsländern unerheblich sein (weniger als 0,5 %) und die Auswirkungen auf das menschliche Wohlergehen enorm positiv, wenn wir die vermiedenen negativen Auswirkungen des ungebremsten Klimawandels berücksichtigen. Die Investitionskosten für den Übergang zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft könnten sich auf etwa 1,0 bis 1,5 % des BIP pro Jahr belaufen, sind aber eindeutig erschwinglich – insbesondere in einer Zeit anhaltend niedriger Zinsen.

### Sektorale Vermeidungskosten pro verringerter Tonne CO<sub>2</sub>

Die sektoralen Kosten pro verringerter Tonne CO<sub>2</sub> variieren je nach Region und werden sich im Laufe der Zeit angesichts der inhärent unsicheren technologischen und Kostentrends entwickeln:



Im **Energiesektor, bereits elektrifizierten Sektoren** (z. B. Gebäudetechnik und Kühlung) und **bald elektrifizierten Sektoren** (z. B. leichte Nutzfahrzeuge), kann die Dekarbonisierung zu niedrigen, ohne oder gar negativen Kosten erreicht werden. Dies spiegelt die niedrigen und immer noch sinkenden Kosten erneuerbarer Energien und die inhärente Effizienz elektrifizierter Prozesse wider.



Im **Ferntransport** (Schifffahrt und Luftverkehr) wird die Umstellung auf „Drop-in“-Kraftstoffe langfristig erhebliche Vermeidungskosten bedeuten, verglichen mit den Alternativen auf Basis fossiler Brennstoffe (100 bis 300 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>).



In **der Schwerindustrie** werden die Kosten moderat bis hoch sein, je nach erforderlicher Prozess- und Brennstoffumstellung (zwischen 25 US-Dollar und mehr als 200 US-Dollar pro Tonne CO<sub>2</sub>). Zement und Kunststoffe werden die am teuersten zu dekarbonisierenden Materialien sein. Eine Reduzierung des Primärmaterialbedarfs durch Recycling, Materialeffizienz und Verwendung alternativer CO<sub>2</sub>-neutraler Materialien könnte sich jedoch als kostengünstigere Lösung erweisen.



Bei **der Gebäudeheizung** werden die Vermeidungskosten je nach Region und Gebäudetyp sowie aufgrund der zur Dekarbonisierung verwendeten Technologie erheblich variieren.



Im **Agrarsektor** sollte die Dekarbonisierung der direkten und indirekten Nutzung von Energie recht kostengünstig sein, aber eine Verbesserung der landwirtschaftlichen Praktiken zur Reduzierung von Nitraten und Methanemissionen könnte einen Kostenaufwand bedeuten.



# Auswirkungen auf den Lebensstandard und das Wirtschaftswachstum

Die Auswirkungen auf den konventionell gemessenen Lebensstandard im Jahr 2050 lassen sich abschätzen, indem man die zusätzlichen Kosten berücksichtigt, die für eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft in diesem Jahr im Vergleich zu einer kohlenstoffintensiven Wirtschaft erforderlich sind. Die ETC schätzt ein, dass [Abbildung E]:

- Bei einem Szenario mit hohen Kosten und bei begrenzter Verbesserung der Energieproduktivität die zusätzlichen Kosten **0,49 % des prognostizierten globalen BIP (1,6 Billionen US-Dollar pro Jahr)** betragen könnten.
- Bei einem Szenario mit niedrigen Kosten und maximaler Energieproduktivität die Kosten so gering wie **0,17 % des globalen BIP pro Jahr** (600 Mrd. US-Dollar pro Jahr) sein könnten.
- In beiden Szenarien **die Kosten von drei spezifischen Sektoren dominiert werden:** Zement (und damit Baukosten), Luftfahrt und Schifffahrt. Die Kosten für die Dekarbonisierung von Gebäudeheizungen könnten in einigen spezifischen Ländern ebenfalls von Bedeutung sein, sind aber als Prozentsatz des globalen BIP sehr gering. Die meisten anderen Sektoren der Wirtschaft können zu sehr niedrigen, ohne oder sogar negativen Kosten dekarbonisiert werden.

## **Diese Kosten stehen im Gegensatz zu den potenziellen negativen Folgen eines unverminderten Klimawandels.**

Jüngsten Schätzungen zufolge hat die Erwärmung seit 2000 sowohl den USA als auch der EU bereits mindestens 4 Billionen US-Dollar an Produktionsverlust gekostet, und die tropischen Länder sind um 5 % ärmer als sie dies ohne Erwärmung wären. Darüber hinaus wird eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft die lokale Luftqualität dramatisch verbessern, Leben retten und die Gesundheit verbessern. Schätzungen gehen davon aus, dass die schlechte Luftqualität derzeit weltweit jährlich 4,2 Millionen vorzeitige und vermeidbare Todesfälle verursacht.<sup>6</sup>

Die geringen Auswirkungen auf den Lebensstandard spiegeln die Tatsache wider, dass **in vielen Sektoren die Auswirkungen der Dekarbonisierung der Verbraucherpreise unerheblich sein werden** [Abbildung F]. Während die Dekarbonisierung in der Schwerindustrie die Kosten für eine Tonne Stahl erheblich erhöhen könnte, würden die daraus resultierenden Kostensteigerungen für die Verbraucherpreise weniger als 1 % betragen. Ähnlich würde die Dekarbonisierung der Schifffahrt wahrscheinlich eine starke Erhöhung der Schifffahrtskosten erfordern, jedoch wären die Auswirkungen auf die Kosten importierter Waren minimal.

In einigen spezifischen Sektoren werden die Auswirkungen auf die Endverbraucherkosten jedoch erheblich sein, und in einigen davon ist es wesentlich, wichtige Auswirkungen auf die Distribution zur Kenntnis zu nehmen. Insbesondere könnten die Kosten für die Dekarbonisierung von Wohnraumheizungen erhebliche Auswirkungen auf ärmere Haushalte in unzureichend isolierten Wohnungen haben. Auch im Luftverkehr könnten die Endverbraucherpreise erheblich steigen. Aber die Auswirkungen auf den Lebensstandard der Verbraucher werden angesichts des geringen Anteils von Flugreisen an Verbraucherausgaben (etwa 3 % in Industrieländern) nach wie vor minimal sein, und die Verteilungseffekte werden progressiv und nicht regressiv sein, wenn man bedenkt, dass einkommensstärkere Gruppen mehr Flugreisen unternehmen.

Darüber hinaus ist es wichtig, einige **Übergangseffekte auf dem Arbeitsmarkt** zu antizipieren und zu steuern. Wie bei jedem Prozess des technologischen Wandels werden durch den Übergang zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft einige bestehende Arbeitsplätze verlorengehen und gleichzeitig neue Arbeitsplätze anderswo geschaffen. Insgesamt dürfte die störende Auswirkung auf die Beschäftigung weit weniger bedeutend sein als andere Veränderungen, mit denen sowohl Industrie- als auch Entwicklungsländer bereits konfrontiert sind, wie die Automatisierung der Fertigung, die Verlagerung des Einzelhandels von traditionellen zu Online-Arten und die kontinuierliche Neuorganisation der globalen Lieferketten, wenn sich die relativen Kosten ändern.

Aber es wird erhebliche **negative Auswirkungen auf die Beschäftigung in drei Sektoren** geben, die häufig regional konzentriert sind: den Kohlebergbau in einigen Entwicklungsländern; den Automobilsektor, da Elektrofahrzeuge viel einfacher herzustellen sind; und die Viehzucht, die von einer großen Verlagerung weg vom Fleischkonsum betroffen sein könnte.

Sorgfältig durchdachte nationale und regionale **Strategien für einen gerechten Übergang** können erforderlich sein, um die Schaffung von Arbeitsplätzen in den betroffenen Regionen zu kompensieren.

6. Weltgesundheitsorganisation (2016), *Mortality and Burden of Disease from Ambient Air Pollution*.

# Die Dekarbonisierung der Wirtschaft würde erheblich weniger kosten, wenn Verbesserungen der Energieproduktivität angestrebt würden

Gesamtkosten der Dekarbonisierung  
 Billionen US\$ pro Jahr, 2050

X % Anteil am weltweit prognostizierten BIP, 2050

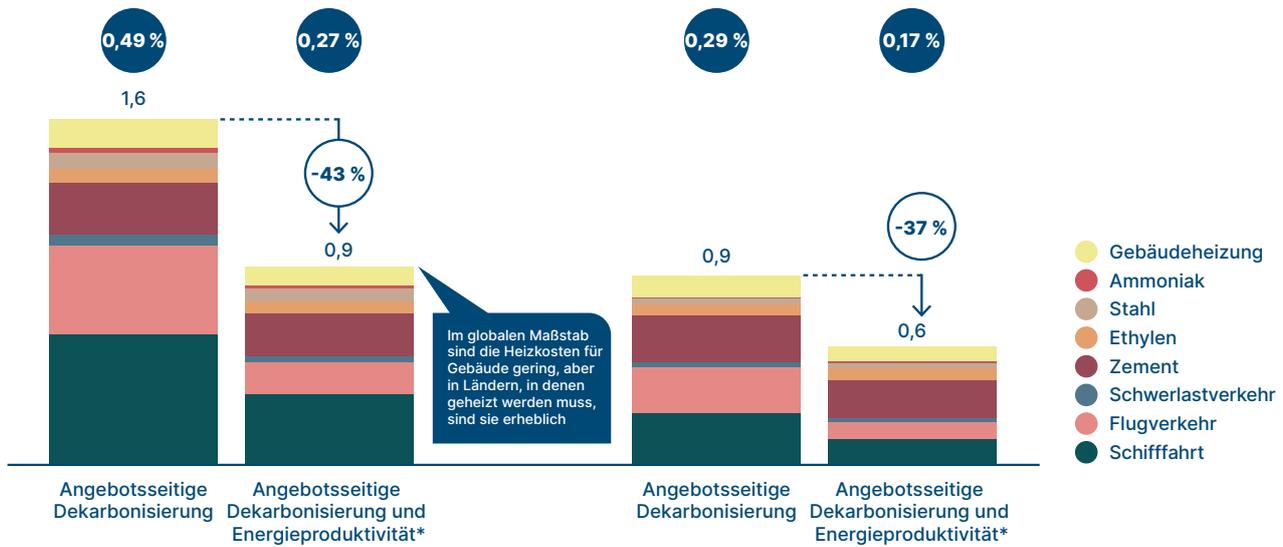


Abbildung E

## Szenario mit hohen Kosten

## Szenario mit geringen Kosten

ANMERKUNG: Der Begriff „Energieproduktivität“ umfasst Energieeffizienz, Materialeffizienz und Dienstleistungseffizienz.

QUELLE: SYSTEMIQ Analyse für die Energy Transitions Commission (2020) basierend auf McKinsey & Company (2018), *Decarbonization of industrial sectors: the next frontier* (Dekarbonisierung des Industriesektors: die nächste Grenze) und die Materialökonomische Analyse für die Energy Transitions Commission (2018)

## Die Dekarbonisierung hätte erhebliche Auswirkungen auf die Preise der Zwischenprodukte, in den meisten Sektoren aber nur eine geringfügige Auswirkung auf die Preise der Endprodukte.

		Auswirkung auf die Kosten der Zwischenprodukte US\$ / % Preissteigerung	Auswirkung auf die Endproduktkosten US\$ / % Preissteigerung
<b>Leicht zu elektrifizierende Sektoren</b>			
In den meisten Wirtschaftssektoren (leichte Nutzfahrzeuge, andere Industriezweige, Eisenbahn, Gebäude, die keine Heizenergie nutzen) ist oder werden die Kosten für die saubere Elektrifizierung bald wettbewerbsfähig sein			
Industrie	Kunststoffe	+500 US\$ pro Tonne Ethylen	+0,01 US\$ auf eine Flasche Soda (<1%)
	Stahl	+120 US\$ pro Tonne Stahl	+180 US\$ auf den Preis eines Autos (+1%)
	Zement	+100 US\$ pro Tonne Zement (+30 US\$ pro Tonne Zement)	+15.000 US\$ auf den Preis eines 500.000-Dollar-Hauses (+3%)
Fernverkehr	Schifffahrt	+4 Millionen US\$ auf typische Massengutfrachter-Transportanfragen pro Jahr	+0,03 US\$ pro Kilogramm importierten Zuckers (<1%)
	Flugverkehr	+0,03 - 0,60 US\$ pro Liter Kerosinäquivalent	+40 - 80 US\$ auf einem 6.500 km langen Flug in der Touristenklasse (+10 - 20%)
Gebäudeheizung			+650 - 1000 US\$ auf das Gesamtbudget der Haushaltsnebenkosten in einem Land mit gemäßigttem Klima (basierend auf dem Fall Großbritanniens) (+30 - 45%)

Abbildung F

\*Ausgehend von der Annahme, dass der Ausgangspreis für Ethylen 1000 US\$/Tonne beträgt, obwohl der Preis für Ethylen sehr schwankend ist.

QUELLE: SYSTEMIQ Analyse für die Energy Transitions Commission (2018)

## Herausforderungen in Bezug auf Wettbewerbsfähigkeit in international gehandelten Sektoren

Wie Abbildung F zeigt, wird es selbst in einigen Sektoren, in denen die Auswirkungen auf die Endverbraucherpreise minimal sind, immer noch sehr deutliche Steigerungen bei **den Zwischenproduktkosten** geben – etwa bei einer Tonne Stahl oder Zement oder bei den Frachtsätzen in der Schifffahrt. Dies schafft ein großes potenzielles **Wettbewerbsproblem** in einer Welt des internationalen Handels, verschiedener unabhängiger staatlicher Regierungen und unvollkommener Mechanismen für die internationale Politikkoordination, was durch die verschiedenen Formen der Unterstützung, die es für CO<sub>2</sub>-intensive Tätigkeiten in vielen Ländern noch gibt, weiter verschärft wird.

In der Schwerindustrie, der internationalen Schifffahrt und der Luftfahrt würde eine optimale öffentliche Politik eine internationale Koordination erfordern. Dies könnte durch Zusammenschlüsse von Ländern, die eine wichtige Rolle in einem bestimmten Sektor spielen, anstatt durch Vereinbarungen auf Ebene der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) koordiniert werden. Wo eine solche internationale Koordination als zweitbeste Politik nicht erreicht werden kann, werden **nationale Kohlenstoffpreise in Verbindung mit der Anpassung der CO<sub>2</sub>-Kosten an den Grenzen** erforderlich sein, um den Übergang schnell genug voranzubringen, um bis Mitte des Jahrhunderts eine Dekarbonisierung zu erreichen.

## Brutto- und Nettoinvestitions-Anforderungen

Die Auswirkungen einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft auf das menschliche Wohlergehen im Jahr 2050 werden daher enorm positiv sein. Aber um dorthin zu gelangen, müssen wir einige **Übergangskosten akzeptieren, die durch höhere Investitionen pro Jahr** während des Aufbaus dieser neuen Wirtschaft **entstehen**. Die ETC schätzt, dass die erforderlichen zusätzlichen Investitionen – auch wenn sie in absoluten Dollarbeträgen signifikant sind – nicht mehr als 1 bis 1,5 % des globalen BIP betragen werden (~1 bis 2 Billionen US-Dollar pro Jahr), und angesichts der derzeitigen globalen Ersparnisse und Investitionen leicht bezahlbar sind, insbesondere im vorherrschenden makroökonomischen Kontext der anhaltend niedrigen Zinsen. Das Ausmaß der erforderlichen Investitionen ist gering im Vergleich zu den massiven öffentlichen Ausgaben und Haushaltsdefiziten, die jetzt für die Ankurbelung der Wirtschaft nach der COVID-19-Krise eingesetzt werden und bieten – wenn gut konzipiert – eine Chance, die Energiewende zu beschleunigen.

Die mit Abstand größten Investitionen sind zum Aufbau eines **globalen Stromsystems** erforderlich, das 100.000 TWh pro Jahr liefern kann, einschließlich neuer erneuerbarer Stromkapazitäten, Übertragungs- und Verteilernetzwerken, Batteriespeichern für die tägliche Flexibilität und zusätzlicher Technologiebereitstellung für untätige und saisonale Flexibilität. Dies würde eine zusätzliche jährliche Gesamtinvestition von etwa 1 bis 1,5 Billionen US-Dollar pro Jahr bedeuten. Die Intensivierung der **Wasserstoffproduktion**, des Transports und der Speicherung wird ebenfalls massive Investitionen in Elektrolyseanlagen oder in Anlagegüter für die Dampfmethan-Reformierung oder die autotherme Reformierung in Kombination mit CCS erfordern: Diese Investition könnte sich über 30 Jahre auf rund 3,7 Billionen US-Dollar belaufen oder 130 Milliarden US-Dollar pro Jahr. Große Investitionen werden auch erforderlich sein, um **Gebäude in Städten** auf kohlenstoffarme statt auf kohlenstoffintensive Weise zu bauen und Bestandsgebäude zu sanieren.

## III. Regionale Unterschiede, Herausforderungen und Chancen

### Regionale Unterschiede bei der Ressourcenausstattung

Die Ressourcenausstattungen variieren je nach Region und Land erheblich. Zum Beispiel:

- Das Potenzial erneuerbarer Energien variiert je nach Klima, Breitengrad und Geographie stark, wobei Standorte wie Westchina, die Sahara und Chile gut aufgestellt sind, um reichlich billigen Strom zu produzieren.
- Die gesamte verfügbare Versorgung mit nachhaltiger Biomasse variiert ebenfalls stark: China verfügt pro Kopf über viel begrenzte Biomasseressourcen als ein Großteil des amerikanischen Kontinents. Die zentrale Frage ist jedoch, wie viele dieser Ressourcen wirklich nachhaltig zur Verfügung stehen. Die Verteilung nachhaltiger, kohlenstoffarmer Biomasse für die Nutzung im Energie- und Industriesystem könnte sehr unterschiedlich sein – und in Regionen außerhalb des tropischen Gürtels konzentriert, mit weniger Risiken der damit verbundenen Entwaldung.

Infolgedessen werden die relativen Kosten der verschiedenen Dekarbonisierungswege je nach Region variieren, ebenso wie der optimale Weg zur sektoralen Dekarbonisierung in den Sektoren, in denen mehrere Lösungen zur Verfügung stehen. Die überarbeiteten national festgelegten Beiträge (NDC) und langfristigen Strategien für niedrige Treibhausgasemissionen, die der UNFCCC als Teil des Pariser Abkommens in Kürze vorgelegt werden, sollten daher explizit die inhärenten erneuerbaren natürlichen Ressourcen und die Auswirkungen auf eine optimale Dekarbonisierungsstrategie bewerten.

## Herausforderungen und Chancen für Entwicklungsländer

Als allgemeiner Grundsatz gilt, dass **Industrieländer raschere Fortschritte erzielen sollten**, um sowohl ihre größere Verantwortung für die Emissionen der Vergangenheit als auch die Tatsache zu berücksichtigen, dass höhere Einkommen es einfacher machen, die kleinen, aber immer noch spürbaren Auswirkungen auf den Lebensstandard abzufangen.

Die ETC ist daher von folgendem Gesamtziel überzeugt:

- Alle reichen Industrieländer erzielen bis spätestens 2050 CO<sub>2</sub>-Neutralität.
- Alle Entwicklungsländer erzielen bis spätestens 2060 CO<sub>2</sub>-Neutralität.

Einige **Entwicklungsländer könnten jedoch bis 2050 oder früher eine vollständige Dekarbonisierung** zu minimalen zusätzlichen Kosten im Vergleich zu dem Ziel von 2060 **erreichen**. Dies liegt daran, dass einige Entwicklungsländer mit erheblichen potenziellen Solar- und Windenergie-Ressourcen gesegnet sind, was die Kosten für die Dekarbonisierung drastisch senkt. Einige haben möglicherweise auch Stromsysteme, die noch so unterentwickelt sind, dass es möglich ist, **„gleich von Anfang an“ CO<sub>2</sub>-neutrale Energiesysteme aufzubauen**, wobei die kostengünstigsten CO<sub>2</sub>-neutralen Technologien verwendet werden.

**Zwei Länder sind für den weltweiten Emissionsverlauf besonders wichtig**, angesichts ihres Anteils an den gesamten derzeitigen oder zukünftigen potenziellen globalen Emissionen, des Tempos, mit dem diese Emissionen ohne eine saubere Energiewende ansteigen würden, und des Beispiels, das sie für andere Entwicklungsländer vorgeben:



**China** ist derzeit noch ein Entwicklungsland mit einem Pro-Kopf-BIP (Kaufkraftparitätsbasis) von etwa 40 % des westeuropäischen Niveaus. Jedoch hat das Land ein klares nationales Ziel, bis 2050 eine „voll entwickelte reiche Wirtschaft“ zu werden. Angesichts seiner hohen Ersparnisse und Investitionen, seiner Ausstattung mit natürlichen Ressourcen und seiner zunehmenden Technologieführerschaft in vielen wichtigen Sektoren könnte und sollte es dieses Ziel erreichen und gleichzeitig zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft werden.



In **Indien** ist ein dramatischer Ausbau der Stromversorgung erforderlich, um das Wirtschaftswachstum, den steigenden Lebensstandard und den raschen Anstieg der Nutzung von Klimaanlagen und die Elektrifizierung des Landtransports zu unterstützen; aber dieser Ausbau kann immer noch bei gleichzeitiger Dekarbonisierung der Stromversorgung erfolgen. Die Analyse von ETC Indien<sup>7</sup> zeigt, dass regenerativer Strom aus Wind und Sonne von 8 % der indischen Stromerzeugung bis 2030 auf ~32 % anwachsen könnte (wobei die gesamte kohlenstoffarme oder CO<sub>2</sub>-neutrale Erzeugung 47 % erreicht), während die gesamte Stromerzeugung verdoppelt wird, und dass die Kosten nicht höher wären als jene einer Unterstützung des Wachstums durch den weiteren Kohleausbau.

Angesichts des Rückgangs der All-in-Kosten für Strom auf erneuerbarer Basis gibt es starke Argumente dafür sicherzustellen, dass der gesamte Ausbau des Stromsystems zur Deckung des wachsenden Strombedarfs in CO<sub>2</sub>-neutraler Form erfolgen sollte. **Die Welt muss keine neuen Kohlekraftwerke bauen**, um das Wirtschaftswachstum und den steigenden Lebensstandard zu unterstützen. Aber damit verbleibt immer noch die Herausforderung, wie man die bestehende Kohlekapazität schrittweise einstellt. Strategien zur Reduzierung und letztendlichen Eliminierung von Emissionen aus vorhandener Kohle müssen eine Mischung aus Ergänzung durch CCS in Kohle- und Gasanlagen, die für Spitzen oder als saisonale Backups verwendet werden (auch wenn dies zwangsläufig zu höheren Kosten für den Gesamtsystembetrieb führt) sowie die Schließung von Kohle- oder Gaskraftwerken vor Ende der Nutzungsdauer, umfassen.

Und schließlich dürften weder ein aggregierter „Kapitalmangel“ noch hohe „Kapitalkosten“ den Fortschritt hin zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft in bereits entwickelten Ländern behindern. Auch in China ist dies angesichts seiner sehr hohen Ersparnisse und Investitionsraten und eines staatlich beeinflussten Finanzsystems, das kostengünstige Investitionsfinanzierungen sicherstellt, kein Hindernis. In vielen anderen Entwicklungsländern sind **die Kapitalkosten jedoch deutlich höher als in den Industrieländern**, und sowohl die begrenzte Verfügbarkeit von Kapital als auch die hohen Kosten könnten ein ernsthaftes Hindernis für ausreichend schnelle Investitionen in neue Energiesysteme darstellen. Es ist von entscheidender Bedeutung, Strategien zu entwickeln, die sich speziell auf **die Mobilisierung angemessener Kapitalflüsse zu angemessen niedrigen Kosten** konzentrieren, einschließlich konzessionärer Finanzströme aus Industrieländern.

7. T. Spencer, N. Rodrigues, R. Pachouri, S. Thakre, G. Renjith, TERI (2020), *Renewable Power Pathways: Modelling The Integration Of Wind And Solar In India By 2030* and R. Pachouri, T. Spencer and G. Renjith, TERI, (2018), *Exploring Electricity Supply-Mix Scenarios to 2030*.

# Fortschritte bis 2030, um bis 2050 eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft zu erreichen

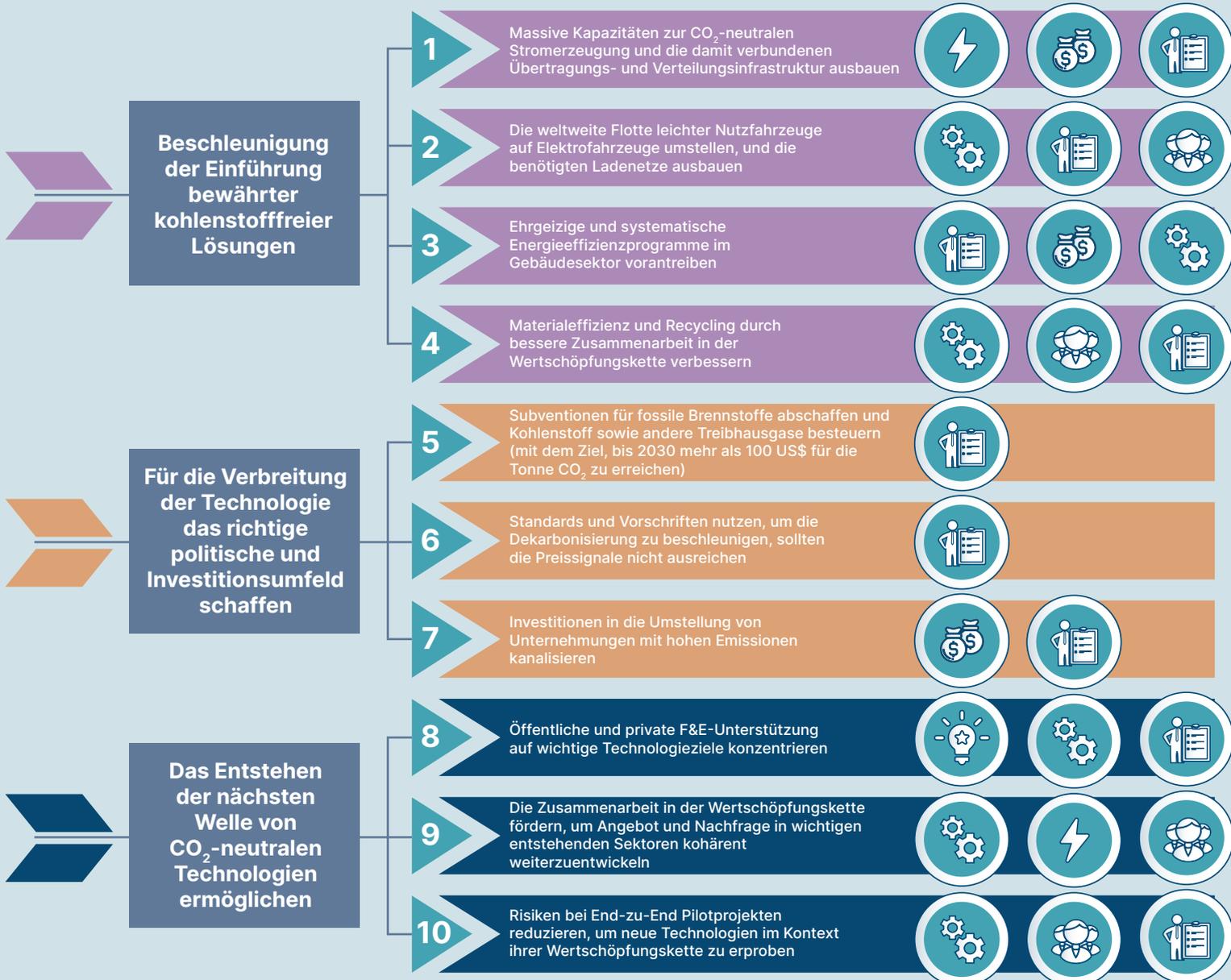
## Eine gemeinsame Verantwortung



### Ziele für 2030

### 10 Schlüsselprioritäten

### Primäre Verantwortlichkeit



## IV. Mission Possible: die jetzt erforderlichen Maßnahmen, um die Ziele für 2050 in Reichweite zu bringen

Es ist wichtig, sich auf das Ziel zu einigen, bis Mitte des Jahrhunderts CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen. Aber es ist auch wichtig, die Maßnahmen und Strategien zu ermitteln und umzusetzen, die in den 2020er Jahren erforderlich sind, um diese Vision zu verwirklichen. Dies erfordert aus zwei Gründen einen deutlich beschleunigten Fortschritt:

- Erstens, wenn es der Welt ernst ist mit dem 1,5 °C-Ziel, muss sie die Emissionen bis etwa 2030 auf 20 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr senken, aber wir sind **weit davon entfernt, diese Verringerung zu erreichen**. Die COVID-19-Krise hat zu einer erheblichen kurzfristigen Reduzierung der globalen Emissionen geführt, aber sie dürften rasch wieder ansteigen, wenn sich die Volkswirtschaften erholen. Und zugrunde liegende Trends sowie die erklärten Strategien und Verpflichtungen (wie in den NDC formuliert, auf die sich die Länder im Rahmen des Pariser Abkommens eingelassen haben) halten die Welt auf dem Weg zu 35 Gt CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2030 und zu einer Erwärmung von 3 °C oder mehr bis zum Ende des Jahrhunderts.
- Zweitens, wird **es unmöglich sein, bis 2050 CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen, ohne dass bis 2030 in vielen Bereichen erhebliche Fortschritte erzielt werden**, aber die derzeitigen Fortschritte bei Investitionen, Technologien und Strategien sind viel zu langsam, um einen Weg zur CO<sub>2</sub>-Neutralität bis 2050 möglich zu machen.

Die nun erforderlichen technologischen Veränderungen können als drei Phasen betrachtet werden: Die anfängliche *Einführung* einer neuen Technologie, ihre *Verbreitung* in erheblichem Umfang und die „*neue normale*“ Phase, in der das gesamte System die neue Mainstream-Technologie übernommen hat. Die Art der in den 2020er Jahren von Industriepolitik und Finanzierung erforderlichen Maßnahmen unterscheidet sich je nach Technologie, abhängig von derenzeitigem Entwicklungsstand. Im Laufe des nächsten Jahrzehnts sind drei Maßnahmen erforderlich, um den Übergang in diesen Phasen zu beschleunigen.

**Erstens sollten wir den Einsatz von CO<sub>2</sub>-neutraler Energie und anderer bewährter Technologien und Geschäftsmodelle zur Emissionsreduzierung beschleunigen.** Wo kohlenstoffarme Lösungen zu ähnlichen oder niedrigeren Kosten als die kohlenstoffintensive Alternative existieren, sollte der Schwerpunkt auf der Erschließung von Investitionen in großem Maßstab liegen, um in den 2020er Jahren schnell eingesetzt zu werden und kurzfristig erhebliche Emissionsminderungen zu erzielen:

- Im **Energiesektor** ist die entscheidende Priorität jetzt nicht die Technologieentwicklung (außer bei einigen Speichertechnologien), sondern das schnellere Voranbringen von Investitionen in erneuerbare Energien, um eine saubere Elektrifizierung zu unterstützen und den Sektor auf den Weg zur CO<sub>2</sub>-Neutralität zu bringen. Die erforderlichen Maßnahmen werden klare quantitative Ziele für die Entwicklung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Stromversorgung (hauptsächlich Solar- und Windenergie) bis 2030 und für eine Verringerung der Kohlenstoffintensität der Stromerzeugung (gemessen in Gramm pro kWh) beinhalten, unterstützt durch geeignete Strommarkt-Designs und Finanzierungsmechanismen (einschließlich konzessionärer Finanzierungen in Entwicklungsländern).
- In anderen Sektoren, in denen es einen klaren, kostengünstigen Weg zur Dekarbonisierung gibt – wie **dem Landtransport, der Gebäudeheizung und dem Materialkreislauf** – besteht die entscheidende Priorität darin, eine schnelle Umsetzung dieser Lösungen sicherzustellen, indem die wirtschaftlichen Argumente für Veränderungen durch klare und zwingende Vorschriften gestärkt (z. B. Verbot von Neuverkäufen leichter Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor in den frühen 2030er Jahren, Bereitstellung von Finanzierungslösungen zur Deckung der Vorlaufkosten bei Gebäudesanierungen) und nichtwirtschaftliche Hürden beseitigt werden (z. B. Verbesserung der Abfallsammlung für umfangreicheres und hochwertigeres Recycling) sowie Kapital in großem Umfang mobilisiert wird.

**Zweitens sollten wir die richtigen politischen und Investitionsbedingungen schaffen, um die Verbreitung von Technologien in allen Sektoren zu ermöglichen, in denen Technologien marktreif aber die Kosten dafür immer noch nicht wettbewerbsfähig sind.** Der spezifische Mix aus technologischen Pfaden und umgesetzter Klimapolitik sollte auf die nationalen Gegebenheiten und die bestehende politische Landschaft zugeschnitten sein und wird daher von Land zu Land variieren. Die wichtigsten Prioritäten sind drei:

- Erstens sollten wir die angemessene Preisgestaltung externer Effekte sicherstellen, indem wir alle verbleibenden Subventionen für fossile Brennstoffe abschaffen, explizite CO<sub>2</sub>-Preismechanismen nutzen und das Verursacherprinzip anwenden. Um inhärente Wettbewerbsfragen der CO<sub>2</sub>-Preisgestaltung für global gehandelte Waren im Falle fehlender internationaler Vereinbarungen hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Preisgestaltung zu vermeiden, müssen diese Systeme mit Steueranpassungen für Kohlenstoff an den Grenzen kombiniert werden. Gut konzipierte marktbasierende Ansätze dieser Art sind potenziell sehr effiziente Hebel, da sie Unternehmen Flexibilität bei der Reduzierung von Emissionen ermöglichen und Innovationen fördern.
- Zweitens sollten die Regierungen in Sektoren, in denen die CO<sub>2</sub>-Preise wahrscheinlich nicht ausreichen, um Veränderungen bei Investitions- und Kaufentscheidungen auszulösen, Standards und Vorschriften aufstellen, um explizite Ziele festzulegen, eine größere Marktsicherheit zu schaffen und damit Investitionen zu erleichtern. Diese könnten die Form von THG-Emissionsstandards, Vorschriften für erneuerbare Energien oder Brennstoffe und schließlich Verboten für die kohlenstoffintensivsten Produkte annehmen.
- Drittens erfordert die vollständige Dekarbonisierung der Wirtschaft ab den 2020er Jahren umfangreiche Investitionen in saubere Energieversorgung und Industrieanlagen (Neubau und Sanierung). Um Kapital in Übergangsaktivitäten zu lenken, bedarf es eines geeigneten politischen Umfelds, eines klaren Investitionsplans zur Ermittlung des Investitionsbedarfs, einer Bewertung der sektoralen Übergangsrisiken und -Chancen für Finanzinstitute, einer gemeinsamen Definition dessen, was als Übergangsfinanzierung gilt, und der Mobilisierung öffentlicher Mittel, um das Risiko erstmaliger Investitionen zu verringern.

**Und schließlich sollten wir dafür sorgen, dass die nächste Welle CO<sub>2</sub>-neutraler Technologien spätestens Ende der 2020er Jahre auf den Markt gebracht wird.**

Um dieses Ziel zu erreichen, muss die **Innovationsfinanzierung sowohl aus dem öffentlichen als auch aus dem privaten Sektor** die Entwicklung von Technologien unterstützen, die sich noch in der Entstehungsphase befinden – insbesondere jener, die für mehrere Sektoren relevant sind. Dazu gehören Wasserstoff aus Elektrolyse, synthetische Kohlenwasserstoffproduktion, CCS/U und Biokraftstoffe aus den nachhaltigsten Rohstoffquellen [Abbildung G].

Darüber hinaus erfordert der anfängliche Einsatz dieser Technologien im kommerziellen Maßstab **Risikominderungs-Mechanismen**, um die Kosten (Kapital- und Betriebskosten) und die Risiken (z. B. technologische Risiken, Offtake-Risiken) in jeder Phase der Wertschöpfungskette zu senken. Innovative Modelle zur Risikoverteilung und öffentliche Unterstützungsmechanismen können neue Unternehmenspartnerschaften (z. B. Joint Ventures oder Offtake-Vereinbarungen), innovative Finanzierungsprodukte (z. B. neue Versicherungsmechanismen) und maßgeschneiderte öffentliche Unterstützungsmechanismen (z. B. Steueranreize, Subventionen, gemischte Finanzierungsmechanismen, öffentliche Auftragsvergabe und öffentlich-private Partnerschaften) umfassen.

Neben Innovationen besteht die entscheidende Herausforderung für neue Technologien darin, das **„Henne-Ei“-Problem** zu überwinden, das das Tempo der Entwicklung verlangsamen kann – wobei Anwendungen im Früheinsatz durch hohe Kosten aufgehalten werden, was es den Erzeugern wiederum erschwert, die Skalen- und Lernkurveneffekte zu erzielen, die die Kosten rasch senken können. Um diese Herausforderung zu lösen, müssen koordinierte Maßnahmen über die wichtigsten Wertschöpfungsketten hinweg ergriffen werden, um die Nachfrage nach neuen Produkten in einem Tempo sicherzustellen, das mit dem möglichen Anstieg des Angebots in Einklang steht.

# Wichtige Innovationsbereiche zur vollständigen Dekarbonisierung der Wirtschaft

● Schrittweise Innovation ● Bahnbrechende Innovation



## Elektrifizierung

Günstigere und energiedichtere Batterien

Günstigere und effizientere Wärmepumpen

Elektroöfen für Zement und Chemikalien

Elektrochemische Eisenreduktion für die Stahlproduktion



## Materialeffizienz und Zirkularität

Neue Design für Verbrauchererzeugnisse

Technologien zur Rückverfolgbarkeit, Sammlung, Sortierung und zum Recycling

Neue Geschäftsmodelle: Service als Produkt SaaS, gemeinsame Nutzung



## Wasserstoff

Günstigere Elektrolyse (für 200 US\$/kW)

Günstigere Wasserstoffbrennstoffzellen und -tanks

Langstreckentransport von Wasserstoff über Hochleistungs-Pipeline

Großflächige geologische Lagerung (in Salz- oder Felskavernen)

Schiffsmotoren und Turbinen mit Wasserstoff-/Ammoniakverfeuerung



## Neue Materialien

Kohlenstoffarme Zement- und Betonchemie

Biomaterialien für das Bauwesen

Fasern auf Zellulosebasis als Ersatz für Kunststoffe



## CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung

Effizientere CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor allem bei Zement

Günstigere direkte Luftabscheidung von CO<sub>2</sub>

Verwendung von Kohlenstoff in Beton, Zuschlagstoffen, Kohlefaser



## Bio- und synthetische Chemie

Erhöhte Effizienz der Umwandlung von Lignocellulose/Algenbiomasse

Günstigere Herstellung von synthetischen Kraftstoffen auf Basis einer Kombination aus Wasserstoff und CO<sub>2</sub>

Elektrochemische Eisenreduktion für die Stahlproduktion

Neue chemische Produkte basierend auf biologischen oder synthetischen Rohstoffen



## Ernährung, Land und Ozeane

Präzisions-/digitale Landwirtschaft und regenerative Landwirtschaft

Verbesserte Lieferketten- und Kühlkettenlagerungstechnologien

Alternative Proteine, einschließlich Zuchtfleischsorten

Großflächige, nachhaltige Produktion von Meeresmakroalgen (Meeresalgen)



**BECCS:** Eine Technologie, die Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung kombiniert, um netto-negative Treibhausgasemissionen zu erzeugen.

**BEV:** Batterieelektrisches Fahrzeug.

**Bioenergie:** Erneuerbare Energie aus Materialien aus biologischen Quellen. In diesem Bericht wird der Begriff „nachhaltige Bioenergie“ verwendet, um Bioenergie aus nachhaltiger Biomasse zu beschreiben (siehe Definition von „Biomasse oder Biorohstoffe“).

**Biomasse oder Biorohstoffe:** Organisches Material (d.h. biologisches Material), das auf nachwachsender Basis verfügbar ist. Dazu gehören Rohstoffe, die von Tieren oder Pflanzen wie Holz und landwirtschaftlichen Nutzpflanzen stammen, sowie organische Abfälle aus kommunalen und industriellen Quellen. In diesem Bericht wird der Begriff „nachhaltige Biomasse“ verwendet, um organisches Material zu beschreiben, das erneuerbar ist, einen Lebenszyklus-CO<sub>2</sub>-Fußabdruck hat, der gleich oder nahe Null ist (einschließlich Überlegungen zu den Opportunitätskosten des Bodens) und bei dessen Anbau- und Erntepraktiken ökologische Überlegungen wie Biodiversität und Gesundheit des Bodens berücksichtigt werden.

**Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug (FCEV):** Elektrofahrzeug mit einer Brennstoffzelle, die Strom erzeugt, um den Motor anzutreiben, in der Regel mit Sauerstoff aus der Luft und komprimiertem Wasserstoff.

**CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung (CCS/U):** „CO<sub>2</sub>-Abscheidung“ bezieht sich auf den Abscheidungsprozess nach Energie- und Industrieprozessen, ohne direkte Luftabscheidung. „CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung“ bezieht sich auf die Kombination von CO<sub>2</sub>-Abscheidung und unterirdischer CO<sub>2</sub>-Speicherung, während „CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung“ die Verwendung von Kohlenstoff in kohlenstoffbasierten Produkten (z. B. Beton, Zuschlagstoffe, Kohlefaser) bezeichnet.

**CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequellen:** Der Begriff wird verwendet für erneuerbare Energien (einschließlich Solar, Wind, Wasserkraft, Erdwärme), nachhaltige Biomasse, nukleare und fossile Brennstoffe, wenn deren Nutzung durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung dekarbonisiert werden kann.

**CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft:** Dies beschreibt die Situation, in der ein bestimmter Wirtschaftssektor keine CO<sub>2</sub>-Emissionen freisetzt – entweder weil er keine produziert oder weil er das produzierte CO<sub>2</sub> abscheidet, um es zu nutzen oder zu speichern. In dieser Situation sollte es fast keine Nutzung von Offsets aus anderen Sektoren geben („echte CO<sub>2</sub>-Neutralität“), die nur verwendet werden könnten, um verbleibende Emissionen aufgrund eines Austritts bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung oder im Agrarsektor oder unkontrollierbare Emissionen am Ende der Lebensdauer zu kompensieren. CO<sub>2</sub>-Offsets: Reduzierung der Emissionen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) oder Treibhausgasen, die von einem Unternehmen, Sektor oder einer Wirtschaft zur Kompensation von Emissionen aus anderen wirtschaftlichen Tätigkeiten vorgenommen werden.

**Dampfmethan-Reformierung (SMR):** Ein Prozess, bei dem Methan aus Erdgas erhitzt wird und mit Dampf reagiert, um Wasserstoff zu produzieren. Direkte Luftabscheidung (DAC): Die Extraktion von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus der atmosphärischen Luft. Elektrolyse: Eine Technik, die elektrischen Strom verwendet, um eine ansonsten nicht-spontane chemische Reaktion voranzutreiben. Eine Form der Elektrolyse ist der Prozess, der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff spaltet. Er findet in einem Elektrolyseur statt und produziert „grünen Wasserstoff“. Sie kann CO<sub>2</sub>-neutral sein, wenn der verwendete Strom CO<sub>2</sub>-neutral ist.

**Energieproduktivität:** Energieverbrauch pro Einheit des BIP.

**Endenergieverbrauch:** Die gesamte Energie, die dem Endverbraucher für alle Energiezwecke bereitgestellt wird.

**Kohlenstoffpreis:** Ein von der Regierung auferlegter Preismechanismus, bei dem die beiden Hauptarten entweder eine Steuer auf Produkte und Dienstleistungen auf Grundlage ihrer Kohlenstoffintensität oder ein Quotensystem sind, das eine Begrenzung der zulässigen Emissionen im Land oder in der Region festlegt und es Unternehmen ermöglicht, mit dem Recht auf Kohlenstoffausstoß (Emissionszertifikate) zu handeln.

**Kohlenwasserstoffe:** Eine organische chemische Verbindung, die ausschließlich aus Wasserstoff- und Kohlenstoffatomen besteht. Kohlenwasserstoffe sind natürlich vorkommende Verbindungen und bilden die Grundlage von Rohöl, Erdgas, Kohle und anderen wichtigen Energiequellen.

**Kombizyklus-Gasturbine (CCGT):** Ein Zusammenschluss aus Wärmekraftmaschinen, die im Tandem aus der gleichen Wärmequelle arbeiten, um die Wärme in mechanische Energie umzuwandeln, die elektrische Generatoren antreibt.

**Natürliche Kohlenstoffsenken:** Natürliche Reservoirs, die mehr CO<sub>2</sub> speichern als sie emittieren. Wälder, Pflanzen, Böden und Ozeane sind natürliche Kohlenstoffsenken.

**Primärenergieverbrauch:** Rohenergie, die direkt an der Quelle genutzt oder ohne Umwandlung an die Nutzer geliefert wird – also Energie, die keinem Umwandlungsprozess unterzogen wurde.

**SMR mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (SMR+CCS):** Wasserstoffproduktion aus SMR (siehe oben), bei der der bei der Verbrennung von Erdgas ausgestoßene Kohlenstoff zur Wiederverwendung oder Speicherung abgeschieden wird.

**Stromgestehungskosten (LCOE):** Ein Maß für die durchschnittlichen Nettokosten der Stromerzeugung für ein Kraftwerk über dessen Lebensdauer hinweg. Die LCOE werden als Verhältnis zwischen allen diskontierten Kosten über die Lebensdauer eines stromerzeugenden Kraftwerks dividiert durch eine diskontierte Summe der tatsächlich gelieferten Energiemengen berechnet.

**Treibhausgase (THG):** Gase, die Wärme in der Atmosphäre einschließen – CO<sub>2</sub> (76 %), Methan (16 %), Distickstoffoxid (6 %) und Fluorgase (2 %).

**Synfuels:** Flüssige Kohlenwasserstoff-Brennstoffe, die durch Synthetisierung von Wasserstoff aus Elektrolyse und Kohlendioxid produziert werden. Sie können CO<sub>2</sub>-neutral sein, wenn der verwendete Strom CO<sub>2</sub>-neutral ist und das CO<sub>2</sub> aus der Luftabscheidung stammt. Auch als „Power-to-Fuel“ oder „Elektrokraftstoffe“ bekannt.

**Verbrennungsmotor (ICE):** Ein traditioneller Motor, der von Benzin, Diesel, Biokraftstoffen oder Erdgas angetrieben wird. In einem ICE können auch Ammoniak oder Wasserstoff verbrannt werden.

# Danksagungen

## **Das Team, das diesen Bericht erarbeitet hat, bestand aus:**

Lord Adair Turner (Chair), Faustine Delasalle (Director), Laëtitia de Villepin (Head of Thought Leadership), Meera Atreya, Scarlett Benson, Ita Kettleborough, Alasdair Graham, Alex Hall, Hettie Morrison, Sanna O'Connor, Aparajit Pandey, Lloyd Pinnell, Elena Pravettoni, Caroline Randle and Janike Reichmann (SYSTEMIQ).

## **Dieser Bericht baut auf den Analysen auf, die in den letzten Jahren von unseren Wissenspartnern für die Energy Transitions Commission (ETC) durchgeführt wurden, denen wir nochmals für die Qualität ihrer Beiträge danken möchten:**

David Nelson, Felicity Carus and Brendan Pierpont (Climate Policy Initiative); Cecilia Gustafsson and Carl von Utfall Danielsson (Copenhagen Economics); Per Klevnäs, Anders Ahlen and Cornelia Jonsson (Material Economics); Arnout de Pee, Eveline Speelman, Hamilton Boggs, Cynthia Shih and Maaïke Witteveen (McKinsey & Company); Ji Chen, Yiyao Cao, Thomas Koch Blank, Ye Agnes Li, Shuyi Li, Ruosida Lin, Meng Wang, Zhe Wang and Caroline Zhu (Rocky Mountain Institute); Tugce Balik, Naseer Chia, Anne-Caroline Duplat, Antonio E Gelorz, Saira George, Thea Jung, Sachin Kapila, Alessandra Kortenhorst, Isabel Lewren, Jeremy Oppenheim, Ricardo Santana, William Sheldon and Tove Stühr Sjöblom (SYSTEMIQ); Will Hall, Raghav Pachouri, Neshwin Rodrigues, Thomas Spencer, Shubham Thakre and G Renjith (The Energy and Resources Institute); Tristan Smith and Carlo Raucci (University Maritime Advisory Services); Jason Eis, Philip Gradwell, Cor Marjits and Thomas Nielsen (Vivid Economics).

## **Das Team möchte auch den Mitgliedern der ETC für ihre aktive Teilnahme danken:**

Elke Pfeiffer (Allianz); Javier Bonaplata, David Clarke and Nicola Davidson (ArcelorMittal); Abyd Karmali (Bank of America); Albert Cheung (BloombergNEF); Gardiner Hill (BP); Vian Davys (CLP); Dana Barsky (Credit Suisse); Anupam Badola (Dalmia Cement (Bharat) Limited); Bin Lyu (Development Research Center of the State Council); Rebecca Heaton and Ross McKenzie (DRAX); Laura Armitage and Adil Hanif (EBRD); Anton Butmanov and Aleksandra Gundobina (EN+); Rob Kelly and Wei Sue (Energy Transitions Initiative Australia); Michael Ding and Olivia Sang (Envision); Dries Acke, Tom Brookes and Pete Harrison (European Climate Foundation); Bob Ward (Grantham Institute, London School of Economics); Matt Gorman (Heathrow Airport); Andrea Griffin (HSBC); Francisco Laveran (Iberdrola); Chris Dodwell (Impax Asset Management); Christopher Kaminker (Lombard Odier); Elizabeth Watson (Modern Energy); Matt Hinde and Nick Saunders (National Grid); Jakob Askou Bøss, Anders Holst Nymark (Ørsted); Tom Pakenham (Ovo Energy); Xavier Chalbot and Jonathan Grant (Rio Tinto); Elizabeth Hartman and Ned Harvey (Rocky Mountain Institute); Mallika Ishwaran and Jennifer Reilly (Royal Dutch Shell); Emmanuel Normant (Saint Gobain); Sandrine de Guio, Emmanuel Laguarrigue and Vincent Petit (Schneider Electric); Xing Lu (Sinopec Capital); Camilla Palladino (SNAM); Jesper Kansbod and Martin Pei (SSAB); Gabriella Larson and Kristian Marstrand Pladsen (Statnett); Brian Dean (Sustainable Energy For All); Abhishek Goyal (Tata Group); AK Saxena (The Energy and Resources Institute); Reid Detton (United Nations Foundation); Mikael Nordlander (Vattenfall); Johan Engebratt and Niklas Gustafsson (Volvo Group); Dean Cambridge and Jennifer Gerholdt (We Mean Business); Jennifer Layke (World Resources Institute).

Photograph on opposite page by chuttersnap



# Making Mission Possible

**Eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft erreichen**

September 2020

Version 1.0



Energy  
Transitions  
Commission