

# MISSION

WIE WIR CO<sub>2</sub>-NEUTRALITÄT IN SEKTOREN, DIE SCHWER ZU DEKARBONISIEREN SIND, BIS MITTE DES JAHRHUNDERTS ERREICHEN

# POSSIBLE



ZUSAMMEN-  
FASSUNG





# MISSION POSSIBLE

WIE WIR CO<sub>2</sub>-NEUTRALITÄT IN SEKTOREN, DIE SCHWER ZU  
DEKARBONISIEREN SIND, BIS MITTE DES JAHRHUNDERTS ERREICHEN

## ZUSAMMENFASSUNG

NOVEMBER 2018

# DIE ENERGY TRANSITIONS COMMISSION

Die Energy Transitions Commission (ETC) bringt eine vielfältige Gruppe von Führungspersönlichkeiten aus dem Energiebereich zusammen: Energieproduzenten, Energieverbraucher, Anlagenlieferanten, Investoren, gemeinnützige Organisationen und Wissenschaftler aus Industrie- und Entwicklungsländern. Unser Ziel ist die Beschleunigung des Wandels hin zu kohlenstoffarmen Energiesystemen, die eine solide wirtschaftliche Entwicklung ermöglichen und den Anstieg der globalen Temperatur auf deutlich unter 2°C und, soweit wie möglich, auf 1,5 °C begrenzen.

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

Der Bericht *Mission Possible* wurde von den Kommissionsmitgliedern erstellt mit der Unterstützung des ETC Sekretariats, das von SYSTEMIQ bereitgestellt wird. Der Bericht stützt sich auf eine Reihe von Analysen, die von Material Economics, McKinsey & Company, University Maritime Advisory Services (UMAS) und SYSTEMIQ für und in Zusammenarbeit mit der ETC durchgeführt wurden, und basiert zudem auf einer breiteren Literaturrecherche.

Diese Ergebnisse wurden im Rahmen eines sechsmonatigen Beratungsverfahrens entwickelt, indem wir Beiträge von insgesamt mehr als 200 Branchenexperten von Firmen, Industrieinitiativen, internationalen Organisationen, Nichtregierungsorganisationen und Wissenschaft integriert haben. Wir danken allen Beteiligten sehr herzlich für ihre wertvolle Unterstützung.

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 jedem einzelnen Ergebnis, jeder Schlussfolgerung bzw. jeder Empfehlung zustimmen. Die Institutionen, denen die Kommissionsmitglieder angehören, wurden nicht darum gebeten, den Bericht förmlich zu unterstützen.

Die ETC-Kommissionsmitglieder sind sich nicht nur darüber einig, dass es wichtig es ist, CO<sub>2</sub>-Neutralität innerhalb der Energie- und Industriesysteme bis 2050 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 auf der ganzen Welt 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.facebook.com/EnergyTransitionsCommission](https://www.facebook.com/EnergyTransitionsCommission)

[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 KOMMISSIONSMITGLIEDER

### **Laurent Auguste**

Senior Executive Vice-President, Innovation and Markets, Veolia

### **Pierre-André de Chalendar**

CEO, Saint-Gobain

### **Dominic Emery**

Vice President, Group Strategy Planning, BP

### **Will Gardiner**

CEO, DRAX

### **Didier Holleaux**

Executive Vice President, ENGIE

### **Chad Holliday**

Chairman, Royal Dutch Shell

### **Gopi Katragadda**

Chief Technology Officer und Innovation Head, Tata Sons

### **Zoe Knight**

Managing Director und Group Head, Centre of Sustainable Finance, HSBC

### **Jules Kortenhorst**

CEO, Rocky Mountain Institute

### **Rachel Kyte**

UN-Sonderbeauftragte; CEO, Sustainable Energy For All

### **Mark Laabs**

Managing Director, Modern Energy

### **Richard Lancaster**

CEO, China Light and Power

### **Alex Laskey**

Ehemaliger Präsident und Gründer, OPower

### **Auke Lont**

Präsident und CEO, Statnett

### **Ajay Mathur**

Director General, The Energy and Resources Institute; Co-Chair, Energy Transitions Commission

### **Arvid Moss**

Executive Vice President, Energy and Corporate Business Development, Hydro

### **Philip New**

CEO, Catapult Energy Systems

### **Nandita Parshad**

Managing Director, Energy and Natural Resources, Europäische Bank für Wiederaufbau und Entwicklung (EBRD)

### **Andreas Regnell**

Senior Vice President, Strategic Development, Vattenfall

### **Mahendra Singhi**

Group CEO, Dalmia Bharat

### **Andrew Steer**

Präsident und CEO, World Resources Institute

### **Nicholas Stern**

Professor, London School of Economics

### **Nigel Topping**

CEO, We Mean Business

### **Robert Trezona**

Partner, Head of Cleantech, IP Group

### **Jean-Pascal Tricoire**

Chairman und CEO, Schneider Electric

### **Laurence Tubiana**

CEO, European Climate Foundation

### **Adair Turner**

Chair, Energy Transitions Commission

### **Timothy Wirth**

Vice Chair, United Nations Foundation

### **Lei Zhang**

CEO, Envision Group

### **Changwen Zhao**

Director General, Department of Industrial Economy, Development Research Center of the State Council of China

### **Cathy Zoi**

CEO, EVgo

Globale Erwärmung

# MISSION POSSIBLE

CO<sub>2</sub>-Emissionen

Deutlich unter 2°C

Um die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C und möglichst auf 1,5°C zu beschränken, muss die Welt bis zur Mitte des Jahrhunderts CO<sub>2</sub>-Neutralität erreichen.

CO<sub>2</sub>-Neutralität bis Mitte des Jahrhunderts

Die schwer zu dekarbonisierenden Sektoren sind die größte Herausforderung um das Pariser Abkommen zu erreichen

Schwer-Industrie



Zement



Stahl



Kunststoff

Schwer-Transport



Güterverkehr



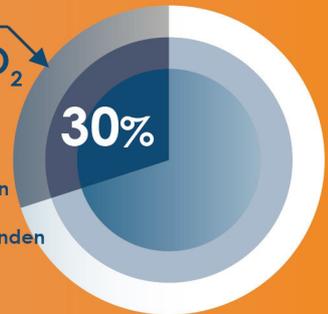
Schifffahrt



Luftfahrt

10GtCO<sub>2</sub>

die gesamten jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der schwer zu dekarbonisierenden Sektoren...



... und ihr Anteil an den verbleibenden Emissionen wird ansteigen, da andere Sektoren wie Strom, Gebäude und leichtere Nutzfahrzeuge erfolgreich dekarbonisieren

CO<sub>2</sub>-Neutralität in Schwerindustrie und -Transport ist bis zur Mitte des Jahrhunderts möglich

Technisch



Technologien sind marktfähig oder befinden sich in der Forschungsphase

Wirtschaftlich



dies wird weniger als 0,5% des globalen BIP kosten

Es gibt drei Hauptwege zur Dekarbonisierung

2

Verbesserung der Energieeffizienz

1

Reduzierung der Nachfrage nach kohlenstoffintensiven Produkten  
Potenzielle Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen:



CO<sub>2</sub>

-40% Kreislaufwirtschaft

CO<sub>2</sub>

-20% Verkehrsmittelverlagerung

3

Implementierung von Dekarbonisierungstechnologien in den Sektoren

4 Schlüsseltechnologien für CO<sub>2</sub>-Neutralität



Strom

massive Elektrifizierung führt zu einem Anstieg des Strombedarfs um das 4-bis 6-Fache



Biomasse

priorisierte und streng regulierte Nutzung, mehr und mehr fokussiert auf die Luftfahrt und Rohmaterialien für Kunststoffe



Kohlenstoffabscheidung

kombiniert mit Nutzung oder Speicherung: wesentliche, jedoch beschränkte Rolle (5-8 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr)



Wasserstoff

wichtige Rolle, führt zu einem Anstieg der Nachfrage um das 7- bis 11-Fache, erreichbar durch drei Produktionswege

Im Rahmen des Pariser Klimaabkommen hat sich die Welt dazu verpflichtet, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C zu begrenzen und sie so nahe wie möglich auf 1,5°C oberhalb vorindustrieller Werte zu halten. Der jüngste IPCC-Bericht<sup>1</sup> warnt die Welt vor den großen negativen Auswirkungen für Planet und Menschheit, die ein Anstieg der globalen Temperaturen um 1,5°C verursachen würden, und vor noch dramatischeren Konsequenzen bei einer globalen Erwärmung um 2°C. Der IPCC drängt die Welt daher dazu, die Grenze von 1,5°C anzustreben, und empfiehlt, weltweit CO<sub>2</sub>-Neutralität weltweit bis 2050 zu erreichen.

Die Energy Transitions Commission (ETC) – eine Koalition von Führungspersönlichkeiten aus Wirtschaft, Finanzwesen und Zivilgesellschaft, aus unterschiedlichen energieproduzierenden und -verbrauchenden Industrien – unterstützt das Idealziel, die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen, und zumindest auf deutlich unter 2°C.

Um das 2°C-Ziel zu erreichen und um überhaupt eine Chance zu haben, die angestrebte 1,5°C-Grenze zu schaffen, ist es von essentieller Bedeutung, CO<sub>2</sub>-Neutralität innerhalb der Energie- und Industriesysteme selbst zu erreichen, ohne durchgängig darauf angewiesen zu sein, Offsets vom Landnutzungssektor zu erwerben. Die ETC ist fest davon überzeugt, dass dies in entwickelten Volkswirtschaften bis 2050 und in sich entwickelnden Volkswirtschaften bis 2060 möglich sein wird<sup>2</sup>.

Dies ist ein Imperativ, aber auch eine große Chance. Wie die New Climate Economy bereits nachgewiesen hat, wird das neue Wirtschaftsmodell, das zur Verhinderung des drohenden Klimawandels erforderlich ist, auch schnelle technische Innovation fördern, die Ressourcenproduktivität steigern, Arbeitsplätze in neuen Industrien schaffen und lokale Umweltvorteile bieten, die zur Steigerung der Lebensqualität beitragen werden.

Die Maßnahmen in den nächsten zehn Jahren werden von entscheidender Bedeutung sein, sowohl um frühzeitige Emissionsreduzierungen zu erreichen, die zur Begrenzung des zunehmenden CO<sub>2</sub>-Bestands in der Atmosphäre notwendig sind, als auch um die Entwicklung zu CO<sub>2</sub>-neutralen Energie- und Industriesystemen bis 2050 zu ermöglichen zu machen.

Für CO<sub>2</sub>-Neutralität in Energie- und Industriesystemen werden schnelle Verbesserungen bei der Energieeffizienz erforderlich sein, kombiniert mit der Dekarbonisierung von Strom und Elektrifizierung möglichst großen Teilen der Wirtschaft. Dies gilt insbesondere für den 'leichten' Straßentransport, bei Produktionsprozessen sowie bei vielen Aktivitäten von Privathaushalten, wie Kochen, Heizen und Kühlen. Im ersten Bericht der Energy Transitions Commission „*Better Energy, Greater Prosperity*“, der im April 2017 veröffentlicht wurde, fokussierten wir uns auf diese Herausforderungen. Dabei haben wir insbesondere gezeigt, dass die starke Kostensenkung für die Erzeugung von erneuerbarer Energien sowie der Energiespeicherungsoptionen es mittlerweile ermöglicht, kostenwettbewerbsfähige Energieversorgungsnetze zu planen, die nahezu vollständig auf Wind- und Solarkraft angewiesen sind (z.B. zu 85-90%).<sup>3</sup>

Um jedoch eine vollkommen dekarbonisierte Wirtschaft zu erreichen, müssen wir auch Emissionen jener Sektoren reduzieren und letztendlich eliminieren, die wir als „Sektoren, in denen eine Emissionsminderung besonders schwierig ist“ bezeichnen, also die Schwerindustrie (insbesondere Zement, Stahl und Kunststoffe) und der Schwertransport (Güterverkehr, Schiff- und Luftfahrt). Diese Sektoren sind gegenwärtig für 10 Gigatonnen (30%) der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Doch nach aktuellen Trends könnten deren Emissionen bis 2050 auf 16 Gigatonnen anwachsen, was – bei gleichzeitiger Dekarbonisierung anderer

---

<sup>1</sup> IPCC (2018), *Global warming of 1.5°C*

<sup>2</sup> Falls wir es schaffen wollen, bis 2050 Netto-Null-CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erreichen, werden während der Übergangsphase negative Emissionen vom Landnutzungssektor erforderlich sein, um die übrigen Emissionen von den Energie- und Industriesystemen in den 2050er Jahren zu kompensieren.

<sup>3</sup> Energy Transitions Commission (2017), *Better Energy, Greater Prosperity*

Wirtschaftssektoren – auch einen größeren Anteil an den Gesamtemissionen bedeuten würde<sup>4</sup>. Viele der bisherigen nationalen Strategien zur Energiewende, wie in den Nationally Determined Contributions (NDCs) zum Pariser Übereinkommen bestimmt, schenken diesen Sektoren jedoch kaum Aufmerksamkeit.

Im letzten Jahr hat sich die ETC daher darauf konzentriert, einen Pfad zu CO<sub>2</sub>-Neutralität in jenen Sektoren festzulegen, in denen eine Minderung der Emissionen besonders schwierig ist. Die gute Nachricht ist, dass dies bis Mitte des 21. Jahrhunderts technisch möglich ist, und zwar zu Kosten für die Wirtschaft von weniger als 0,5% des globalen BIP und bei geringfügigen Auswirkungen auf die Lebensstandards der Verbraucher. Technologien zur Erreichung dieser Dekarbonisierung existieren bereits. Vielen fehlt es noch an der wirtschaftlichen Rentabilität, jedoch brauchen wir keine grundlegenden und gegenwärtig unbekanntenen Forschungsdurchbrüche vorauszusetzen, um zuversichtlich zu sein, dass CO<sub>2</sub>-Neutralität erreicht werden kann. Zudem können die Kosten für die Dekarbonisierung beträchtlich reduziert werden, indem kohlenstoffintensive Materialien besser genutzt werden (durch eine höhere Materialeffizienz und Recycling) und der Nachfragezuwachs nach kohlenstoffintensivem Transport beschränkt wird (durch höhere Logistikeffizienz und Verkehrsverlagerung).

Dieser entscheidende und technisch mögliche Wandel kann jedoch nur vollzogen werden, wenn politische Entscheidungsträger, Investoren und Unternehmen gemeinsam unverzügliche und wirkungsvolle Maßnahmen ergreifen, um die Wirtschaftssysteme zu transformieren.

In diesem Bericht werden daher folgende Fragen behandelt:

- Warum ist das Erreichen von CO<sub>2</sub>-Neutralität in Sektoren, in denen eine Reduzierung besonders schwierig ist, technisch und wirtschaftlich machbar (S.7);
- Wie kann der Wandel zu CO<sub>2</sub>-Neutralität in den Sektoren der Schwerindustrie und Schwertransport vollzogen werden (S.27);
- Was müssen politische Entscheidungsträger, Investoren, Unternehmen und Verbraucher tun, um den Wandel voranzutreiben und zu beschleunigen (S.34).

---

<sup>4</sup> IEA (2017), *Energy Technology Perspectives*

# A. MISSION POSSIBLE: ERREICHEN VON CO<sub>2</sub>-NEUTRALITÄT IN SCHWIERIGER ZU DEKARBONISIERENDEN SEKTOREN IST TECHNISCH MÖGLICH UND WIRTSCHAFTLICH MACHBAR

Es ist technisch möglich, alle Sektoren, in denen Emissionsminderungen besonders schwierig sind, bis Mitte des 21. Jahrhunderts zu dekarbonisieren, und zwar zu Gesamtkosten von deutlich weniger als 0,5% des globalen BIP. Drei sich ergänzende Maßnahmenpakete sind dazu erforderlich:

- **Beschränkung des Nachfragezuwachses** – was zu erheblichen Kostenreduktionen zur Dekarbonisierung im industriellen Sektor führen kann, und in geringerem Maße auch Kosten für die Dekarbonisierung des Schwertransports senken kann;
- **Verbesserung der Energieeffizienz** – was zu frühzeitigem Fortschritt bei der Emissionsminderung führen und etwaige Kosten für die Dekarbonisierung reduziert kann;
- **Anwendung von Technologien zur Dekarbonisierung**<sup>5</sup> – was für das Erreichen von CO<sub>2</sub>-Neutralität in Energie- und Industriesystemen essentiell ist.

## DAS ERREICHEN VON CO<sub>2</sub>-NEUTRALITÄT IN DER SCHWERINDUSTRIE

### NACHFRAGEMANAGEMENT DURCH MATERIALEFFIZIENZ UND KREISLAUFWIRTSCHAFT

**Verstärkte Kreislaufwirtschaft kann CO<sub>2</sub>-Emissionen von den vier wichtigsten Industriesektoren (Kunststoff, Stahl, Aluminium und Zement) bis 2050 weltweit um 40% reduzieren**, in entwickelten Volkswirtschaften, wie z.B. in Europa, sogar um 56%<sup>6</sup> [Abbildung 1]. Dies hat zwei größere Entwicklungen zur Folge: (i) verbesserte Nutzung bestehender Materialbestände durch umfangreicheres und effektiveres Recycling und Wiederverwendung und (ii) Reduzierung der Materialanforderungen in zentralen Wertschöpfungsketten (wie zum Beispiel Transport, Gebäude, Konsumgüter, usw.) durch verbessertes Produktdesign, längere Produktnutzungsdauer und neue Sharing-Business-Modelle (z.B. Carsharing).

- **Die Produktion von Primärkunststoffen könnte im Vergleich zu gängigen Verfahren um 56% reduziert werden**, und zwar durch ein ausgeprägteres mechanisches und chemisches Recycling und durch den verringerten Einsatz von Kunststoffen in zentralen Wertschöpfungsketten.

<sup>5</sup> Die Definition von „Technologien zur Dekarbonisierung“ finden Sie im Glossar. [Wir benutzen den Begriff „Technologien zur Dekarbonisierung“ zur Beschreibung von Technologien, die zur Reduzierung von menschengemachten Kohlenstoffemissionen beitragen, und zwar mithilfe von Produkten und Dienstleistungen, die durch Kraftstoff-/Rohmaterialwandel, Verfahrensumstellungen oder Kohlenstoffbindung angeboten werden. Dies bedeutet nicht die vollständige Eliminierung der Nutzung von CO<sub>2</sub>. Zum einen kann die Nutzung von Biomasse oder von synthetischen Kraftstoffen dazu führen, dass CO<sub>2</sub>, das zuvor durch Biomassenwachstum oder durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft (DAC) sequestriert wurde, wieder in die Atmosphäre gelangt. Zum anderen kann es sein, dass CO<sub>2</sub> immer noch in den Materialien (z. B. Kunststoff) enthalten ist. Energieeffizienz-Technologien schließen wir von der Gruppe der „Technologien zur Dekarbonisierung“ aus, weil diese separat betrachtet werden.]

<sup>6</sup> Material Economics-Analyse für die Energy Transitions Commission (2018)

- **Die Produktion von Primärstahl könnte im Vergleich zu gängigen Verfahren um 37% reduziert werden**, und zwar durch reduzierte Verluste entlang der Wertschöpfungskette, reduziertes Downgrading beim Recycling-Verfahren, erhöhte Wiederverwendung von stahlbasierten Produkten und durch einen Wandel zu neuen Carsharing- und Mietsystemen.
- **Die Produktion von Primäraluminium könnte um 40% reduziert werden**, und zwar durch dieselben Ansätze wie beim Stahl.
- Beim Zement sind die Recycling-Möglichkeiten beschränkter, doch durch eine **verbesserte Gebäudeplanung könnte die Gesamtnachfrage um 34% reduziert werden**.

Um diese Chancen zu ergreifen, sind umfangreiche Veränderungen im Produktdesign und in der Zusammenarbeit zwischen Unternehmen entlang der Wertschöpfungsketten erforderlich. Eine konsequente Politik ist erforderlich, um Anreize für entsprechende Veränderungen zu schaffen.

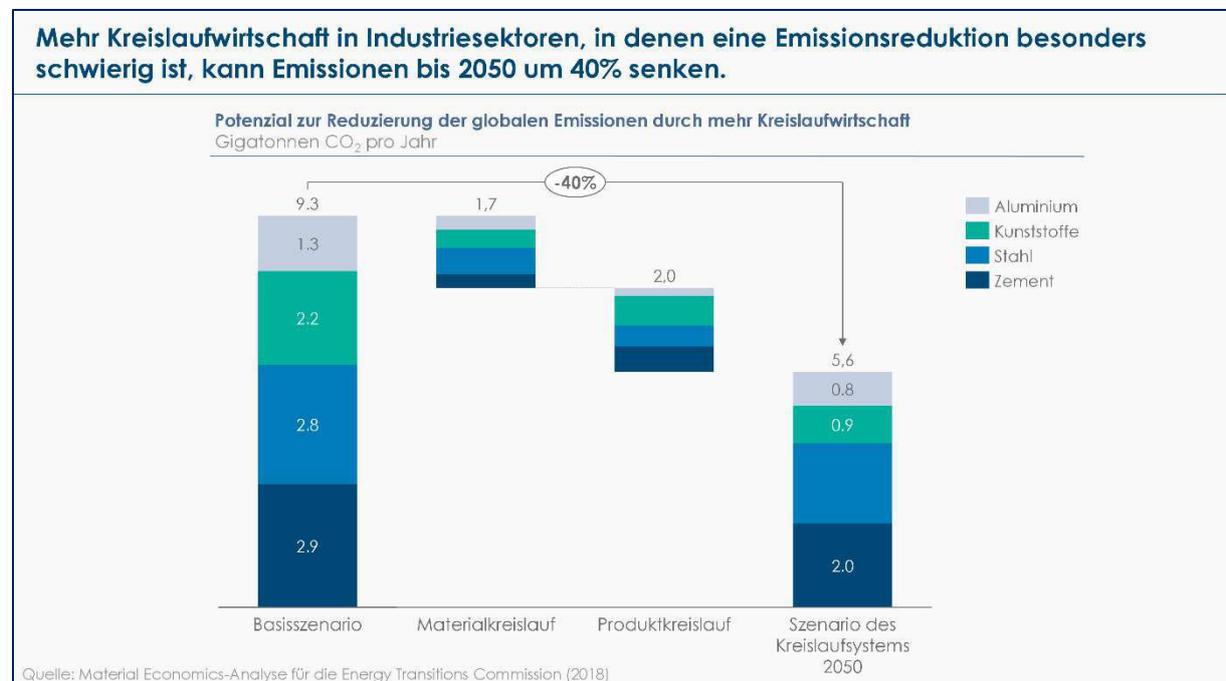


Abbildung 1

## ENERGIEEFFIZIENZ

In den industriellen Sektoren können Verbesserungsmöglichkeiten in der Energieeffizienz bestehender Verfahren zu kurzfristigen Emissionsreduzierungen führen, etwa durch die Anwendung fortgeschrittener Produktionstechniken oder digitaler Technologien. Diese Maßnahmen werden wohl nicht mehr als **15-20% des Energieverbrauchs** ausmachen, aber dennoch essentiell sein, um die Emissionen von existierenden, langlebenden Industrieanlagen zu reduzieren, insbesondere in Entwicklungsländern.

## TECHNOLOGIEN ZUR DEKARBONISIERUNG

In jedem industriellen Sektor gibt es vier Hauptpfade zur Dekarbonisierung der jeweiligen Produktionsverfahren:

- Verwendung von **Wasserstoff als Wärmequelle oder Reduktionsmittel**, im Fall der Stahl- und Chemieproduktion, mit CO<sub>2</sub>-neutralem Wasserstoff, der bei Elektrolyse entsteht (was vermutlich langfristig der dominierende Ansatz zur Dekarbonisierung sein wird), oder mit nahezu-CO<sub>2</sub>-neutralem Wasserstoff, der durch Dampfreformierung von Methan (SMR) mit Kohlenstoffbindung<sup>7</sup> gewonnen wird;
- **Direkte Elektrifizierung von Industrieverfahren**, insbesondere die Erzeugung von Hochtemperaturwärme;
- **Verwendung von Biomasse als Energiequelle zur Wärmeerzeugung**, als Reduktionsmittel bei der Stahlproduktion oder als Rohmaterial, insbesondere bei der Kunststoffproduktion;
- **Kohlenstoffbindung**, entweder in Verbindung mit direkter Verwendung oder unterirdischer Speicherung (CCU/S).

In den einzelnen Industriesektoren wird **je nach Standort** die kosteneffektivste Methode zur Dekarbonisierung **von lokal verfügbaren Ressourcen abhängig sein**. Insbesondere wird sich die Auswahl zwischen strombasierten Methoden und Biomasse- oder Kohlenstoffbindungsoptionen nach dem Preis richten, zu dem CO<sub>2</sub>-neutraler Strom vor Ort verfügbar ist [[Abbildung 2](#)].

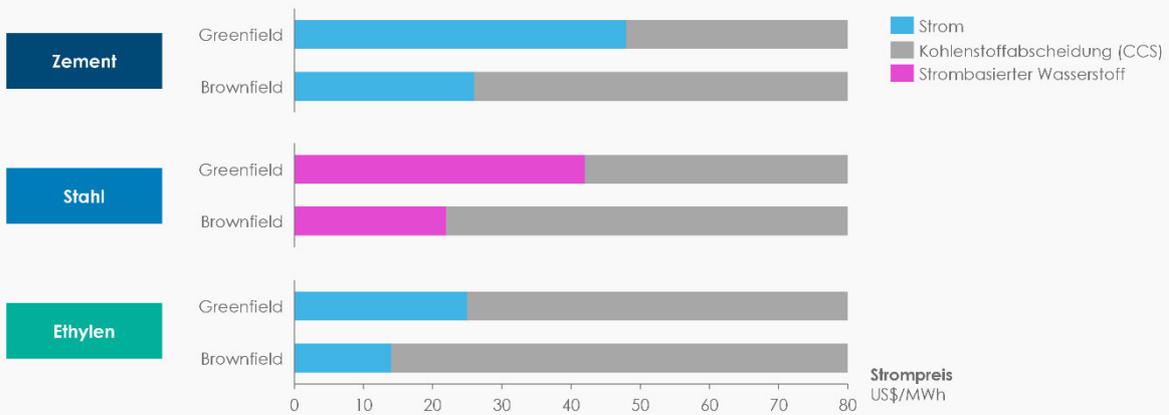
Unabhängig von den jeweiligen Methoden sind wir gemäß unserer Analyse zuversichtlich, dass die Dekarbonisierung der industriellen Sektoren möglich sein wird. Die Kosten werden voraussichtlich für Stahl 53€, für Zement 114€ oder weniger und bei Kunststoffen (Ethylenproduktion) 264€ oder weniger je eingesparter Tonne CO<sub>2</sub> betragen.

---

<sup>7</sup> CO<sub>2</sub>-neutraler Wasserstoff könnte theoretisch auch aus Biomethanreformierung entstehen, auch wenn diese Route vermutlich eher eine geringfügige Rolle spielen wird gegeben des limitierten, nachhaltigen Biomasse-Angebotes.

## Je nach Industriebranche und lokalen Strompreisen kann Dekarbonisierung durch Elektrifizierung günstiger sein als durch Kohlenstoffabscheidung.

Kosten der angebotsseitigen Dekarbonisierung in Abhängigkeit vom Strompreis  
US\$/MWh



Hinweis: Die Kosten für Biomasse können in einigen Geographien geringer sein. Wegen ihrer beschränkten Verfügbarkeit wird Biomasse jedoch nicht als primäre Option in Betracht gezogen.  
Quelle: McKinsey & Company (2018), *Decarbonization of the industrial sectors: the next frontier*

Abbildung 2

## DAS ERREICHEN VON CO<sub>2</sub>-NEUTRALITÄT IM SCHWERTRANSPORT

### NACHFRAGEMANAGEMENT DURCH LOGISTIKEFFIZIENZ UND VERKEHRSVERLAGERUNG

Chancen zur Reduktion des Nachfragezuwachses sind in den Transportsektoren beschränkter als in den Industriesektoren, da der Frachttransport durch das globale Wirtschaftswachstum und die Passagierbeförderung durch den höheren Mobilitätsbedarf in den sich entwickelnden Volkswirtschaften angetrieben wird. Dennoch könnte eine **Kombination aus höherer Logistikeffizienz und Verkehrsverlagerung** – von der Straße auf die Schiene oder auf das Schiff und von Kurzstreckenflügen zu Hochgeschwindigkeitszügen – **insgesamt zu einer Reduktion von bis zu 20% der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen** [Abbildung 3].

**Nachfragemanagement kann Emissionen der Transportsektoren, in denen eine Emissionsreduktion besonders schwierig ist, bis 2050 um 20% senken.**

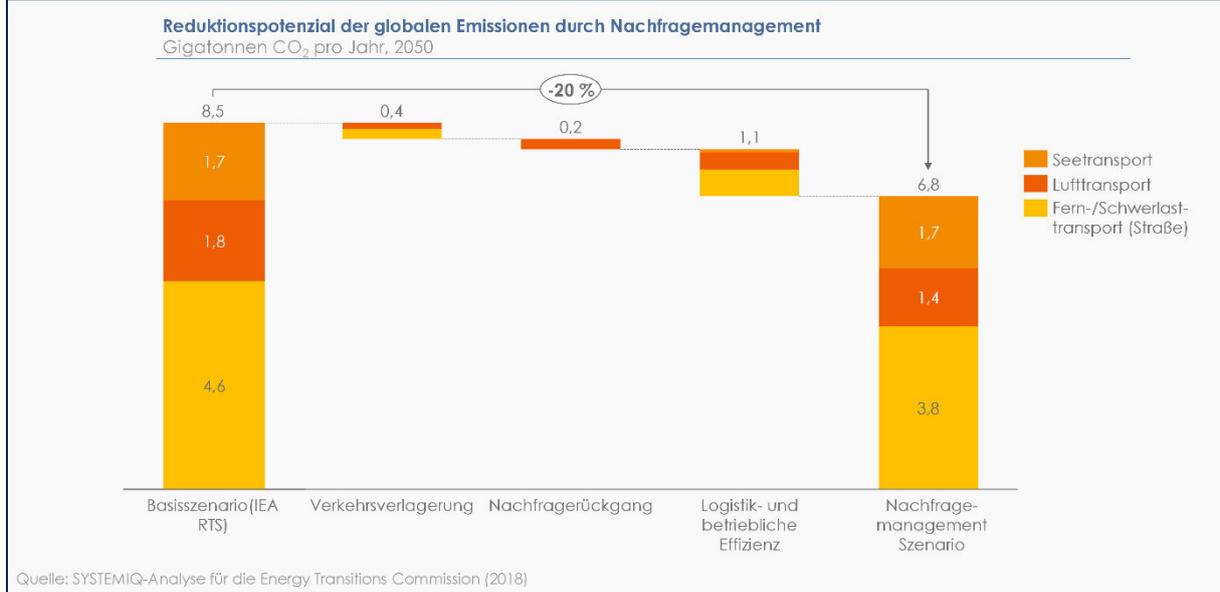


Abbildung 3

## ENERGIEEFFIZIENZ

In den Transportsektoren gibt es auch ohne radikale Änderungen im Technologiebereich **beträchtliche Chancen zur Verbesserung der Energieeffizienz um bis zu 35-40%**. Dieses Potenzial wird insbesondere bei Schiff- und Luftfahrt eine große Rolle spielen aufgrund der langen Nutzungsdauer von Schiffen und Flugzeugen. Potenzielle Energieeffizienzfortschritte bei Motoren und verbessertes Design von Schiffen und Flugzeugen könnten die Umstellungskosten auf einen neuen Kraftstoff stark reduzieren.

## TECHNOLOGIEN ZUR DEKARBONISIERUNG

Welche Methode zur vollständigen Dekarbonisierung dominiert und wie hoch die dabei anfallenden Kosten sein werden, unterscheidet sich stark zwischen Güterverkehr und der Schiff- und Luftfahrt [Abbildung 4].

**Elektrische Antriebe werden den Schwertransport sowie den See- und Lufttransport auf kurzen Strecken dominieren.**



Abbildung 4

- Beim **Schwertransport auf der Straße** werden nahezu sicher elektrische Antriebe wegen **Effizienzvorteilen gegenüber internen Verbrennungsmotoren dominieren**, wobei die Energiespeicherung entweder mit Batterien oder in Wasserstoffform erfolgen wird. Elektro-LKWs werden voraussichtlich in den 2020er Jahren mit Diesel- bzw. Benzinfahrzeugen wettbewerbsfähig sein. Daher werden und sollten Biokraftstoffen und Erdgas nur eine Übergangslösung sein.
- Bei **Schiff- und Luftfahrt** werden **Elektromotoren, die zur Energiespeicherung Batterien oder Wasserstoff benutzen, voraussichtlich für den Kurzstrecken-Transport relevant sein**. Doch ohne großen Durchbruch bei der Energiedichte von Batterien werden **Langstreckenflüge voraussichtlich auf Bio- oder synthetisches Kerosin** angewiesen sein, während bei der **Langstreckenschifffahrt wahrscheinlich Ammoniak oder (in einem geringeren Ausmaß) Biodiesel<sup>8</sup>** in bestehenden Motoren zum Einsatz kommen wird. Da diese Kraftstoffe wahrscheinlich teurer als existierende fossile Kraftstoffe sein werden, könnten die Kosten für die Dekarbonisierung bei der Luftfahrt 101-202€ pro Tonne und bei der Schifffahrt 132-308€ pro Tonne betragen. Jedoch könnten im Laufe der Zeit technische Fortschritte und Skalierungsvorteile bei der Produktion diese Kosten reduzieren.

<sup>8</sup> Aufgrund des limitierten, nachhaltigen Angebots von Biomasse, sollte die Benutzung von Bioenergie in den Sektoren begrenzt werden, in welchen alternative Kraftstoffe mit niedrigen Emissionen existieren.

# MINIMALE KOSTEN FÜR DIE WIRTSCHAFT UND FÜR VERBRAUCHER

## KOSTEN FÜR DIE WELTWIRTSCHAFT

Basierend auf bereits bewährten Dekarbonisierungstechnologien variieren geschätzte Grenzkosten für Emissionsminderung je nach Sektor. Insgesamt sind diese jedoch bei den meisten schwieriger zu dekarbonisierenden Sektoren beträchtlich [Abbildung 5].

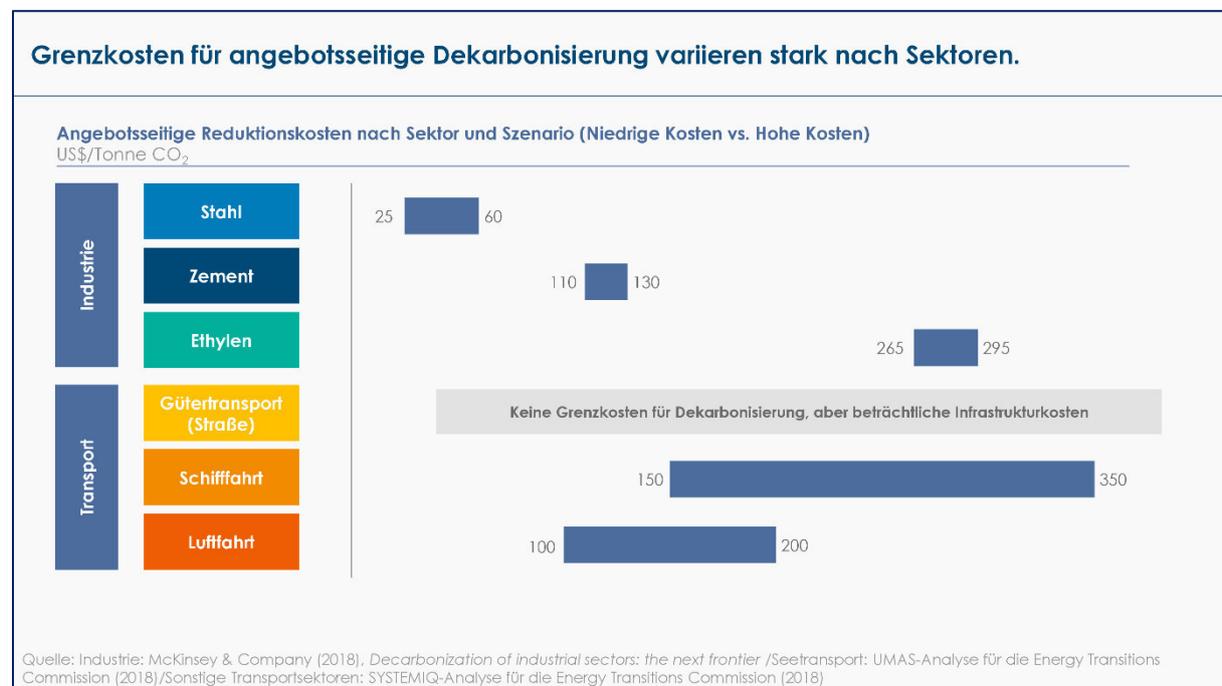


Abbildung 5

Jedoch würden sich – auch bei diesen Kosten, und bei einem Nachfragewachstum entsprechend der “Business-as-usual“-Prognosen – die maximalen zusätzlichen Kosten für eine vollständig CO<sub>2</sub>-neutrale Schwerindustrie und einen CO<sub>2</sub>-neutralen Schwertransport bis 2050 auf nur **0,5% des globalen BIP belaufen** [Abbildung 6]. Die Kosten für den Betrieb einer Wirtschaft ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen wären deutlich geringer als 1% des BIP.

**Vier Sektoren sind Hauptverursacher dieser Kosten.** Innerhalb der Industrie wird die Dekarbonisierung des **Zementsektors** wegen der verfahrensbedingten Emissionen relativ kostenintensiv sein. Dies gilt auch für den **Kunststoffsektor**, weil dort nicht nur produktionsbedingte Emissionen eliminiert werden müssen, sondern auch die Emissionen, die nach Nutzungsdauerablauf entstehen. Innerhalb der Transportsektoren wird die Dekarbonisierung von **Luft- und Schifffahrt** relativ kostenintensiv sein; dagegen werden bei Umstellung auf LKWs mit Stromantrieb oder Wasserstoffbrennstoffzellen voraussichtlich nur minimale Kosten anfallen, wegen des grundsätzlichen Vorteils der durch Elektromotoren gegebenen Energieeffizienz.<sup>9</sup>

Diese Dekarbonisierungskosten könnten durch folgende drei Faktoren erheblich gesenkt werden:

<sup>9</sup> Jedoch werden BEVs und FCEVs werden Infrastrukturinvestitionen erfordern, auf die später in diesem Bericht eingegangen wird.

- Geringere Kosten für Strom aus erneuerbarer Energie:** Wenn CO<sub>2</sub>-neutraler Strom weltweit für 17,5€/Megawattstunde verfügbar wäre (statt 35€/Megawattstunde), würde die Dekarbonisierung der Schwerindustrie 25% weniger kosten. Gleichermäßen würden die Kosten für die Dekarbonisierung von Schiff- und Luftfahrt um 55% fallen, falls die zusätzlichen Kosten für Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe auf 0,26€ pro Liter (statt 0,53€ pro Liter) gesenkt würden. Insgesamt könnten niedrigere Preise für Strom aus erneuerbaren Energien die Gesamtkosten für die Weltwirtschaft von 0,45% auf 0,24% des globalen BIPs reduzieren.
- Nachfragemanagement:** Mehr Recycling und Wiederverwendung von Materialien innerhalb einer Kreislaufwirtschaft könnten – kombiniert mit Logistikeffizienz und modaler (Verkehrs)verlagerung in den Transportsektoren – die Kosten für die Dekarbonisierung der Sektoren, in denen eine Emissionsminderung besonders schwierig ist, um 40-45% reduzieren, und somit auf 0,15-0,25% des globalen BIP senken.
- Zukünftige technologische Entwicklungen:** Wie schon oft in der Geschichte vorgekommen, können Technologiekosten durch Lern- und Skaleneffekte häufig stärker als erwartet reduziert werden, und neue, unvorhergesehene Technologien entwickelt werden. Falls dies in der Zukunft eintreten sollte, könnten Dekarbonisierungskosten dramatisch reduziert oder sogar eliminiert werden. Diese könnten bei Zement beispielsweise weit geringer ausfallen, wenn Lernkurveneffekte und Skalierungsvorteile zur Senkung der Kosten für die Kohlenstoffbindung beitragen würden. Beim Luft- und Schiffahrt würden sich die Kosten für die Dekarbonisierung erheblich verringern, wenn wesentliche Verbesserungen bei der Batteriedichte eine stärkere Einbeziehung der Elektrifizierung ermöglichen würden.

**Dekarbonisierung der Sektoren, in denen eine Emissionsreduktion besonders schwierig ist, würde bis 2050 weniger als 1% des globalen BIP kosten und könnte durch erhöhte Energieeffizienz und effektiveres Nachfragemanagement erheblich günstiger werden.**

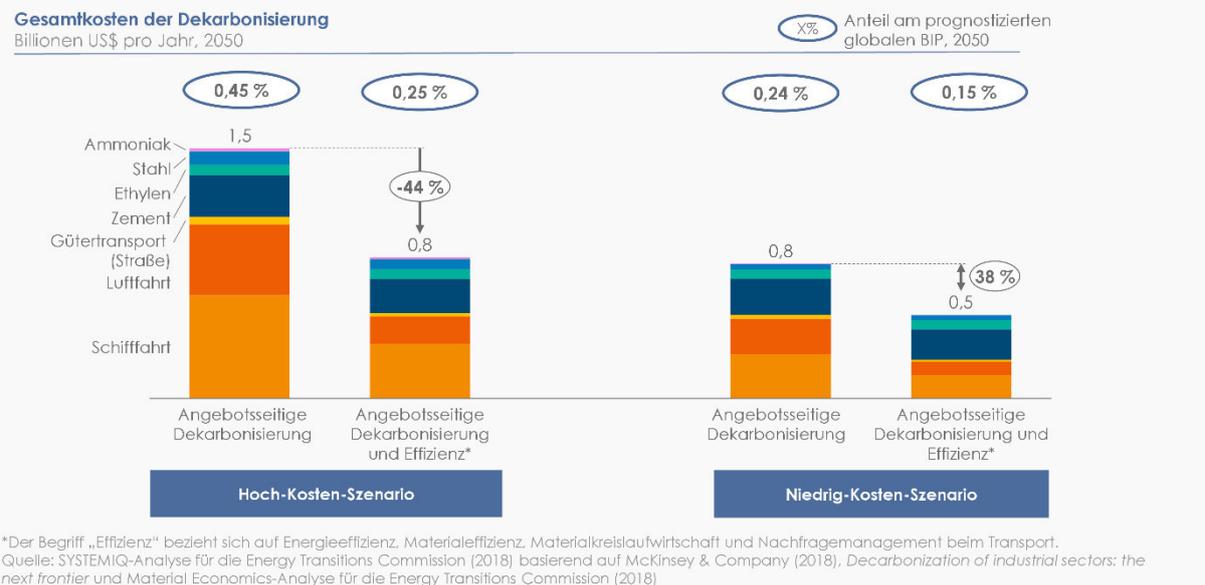


Abbildung 6

Die Analyse der erforderlichen Gesamtkapitalinvestitionen bestätigt ferner, dass eine **vollständige Dekarbonisierung zu erschwinglichen Kosten möglich** ist.

- In den **Industriesektoren** könnten sich die schrittweise zunehmenden Kapitalinvestitionen von 2015 bis 2050 auf 5,5-8,4 Billionen US-Dollar belaufen<sup>10</sup>, was einem akkumulierten BIP in diesem gesamten Zeitraum von 0,1% entsprechen und damit **weniger als 0,5% der voraussichtlichen, globalen Einsparungen und Investitionen** ausmachen würde.
- Gemäß Schätzungen der Europäischen Kommission würden für den CO<sub>2</sub>-neutralen Güterverkehr notwendige Investitionen in Infrastruktur, etwa für Wiederauflade-Stationen oder Wasserstoff-Betankung, **weniger als 5% der üblichen Investitionen in die Transportinfrastruktur ausmachen**<sup>11</sup>.
- Im **Luft- und Schifffahrt wären keine inkrementellen Kapitalinvestitionen notwendig**, sofern die Dekarbonisierung primär durch die Verwendung von CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffen in existierenden Motor-Designs erreicht wird.

Die notwendigen Investitionen in Infrastruktur und Industrieanlagen für den Wandel hin zu CO<sub>2</sub>-neutraler Schwerindustrie und -transport sind daher im Vergleich zu globalen Einsparungen und Investitionen nicht hoch. **Es gibt also keinen Grund zur Annahme, dass ein Mangel an Finanzmitteln den Weg zur CO<sub>2</sub>-Neutralität einschränken würde, sofern angepasste Finanzierungsmechanismen entwickelt werden.**

## KOSTEN FÜR ENDVERBRAUCHER

**Die Auswirkungen der Dekarbonisierung auf die Preise für die Endverbraucher werden je nach Sektor variieren, jedoch insgesamt gering sein** [Abbildung 7]. Die Dekarbonisierung von Stahl wird den Preis für ein Auto wahrscheinlich um nicht mehr als 158€ erhöhen; und die Verwendung von emissionsneutralen Kunststoffen würde den Preis für einen Liter Softdrinks um weniger als 0,008€ erhöhen. **Die signifikantesten Kosten für den Endverbraucher würden in der Luftfahrt entstehen:** Falls Bio- bzw. synthetische Kraftstoffe beträchtlich teurer als herkömmliches Kerosin sein werden, würden Ticketpreise für CO<sub>2</sub>-neutrale internationale Flüge um 10-20% steigen. Da Ausgaben für internationale Flüge jedoch weniger als 3% der globalen Haushaltsausgaben ausmachen, werden die Auswirkungen auf Lebensstandards immer noch sehr gering sein.

---

<sup>10</sup> McKinsey & Company (2018), *Decarbonization of the industrial sectors: the next frontier*

<sup>11</sup> Europäische Umweltagentur (2018)

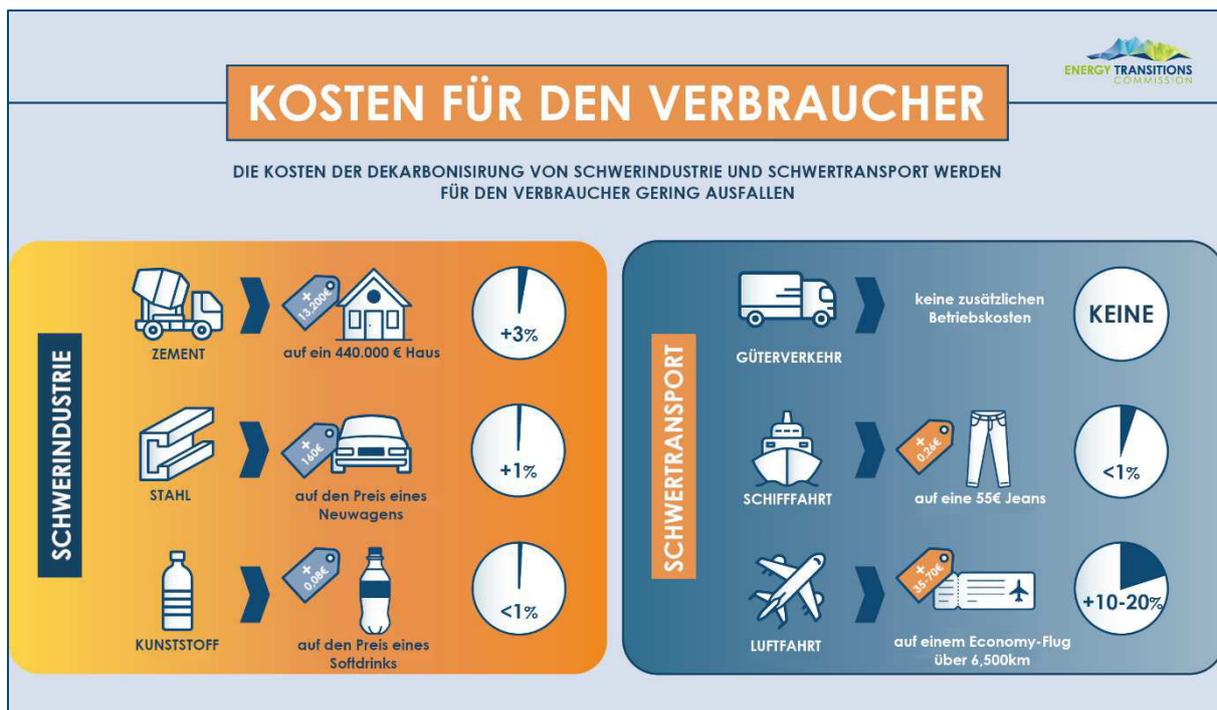


Abbildung 7

## KOSTEN FÜR ZWISCHENPRODUKTE

Selbst wenn die Auswirkungen auf die Endprodukt-Preise gering sind, **können diese auf der Ebene der Zwischenprodukte erheblich sein**. Die Herstellung von CO<sub>2</sub>-neutralem Stahl kann beispielsweise im Vergleich zu herkömmlichem Stahl pro Tonne 20% mehr kosten. Die Finanzierung von initialen Investitionen in kohlenstoffarme Technologien könnte für einige Unternehmen ein Hindernis darstellen, insbesondere wenn dies die Abschreibung bestehender Anlagen vor dem Ende ihrer eigentlichen Nutzungsdauer bedeuten würde. Wenn Zwischenprodukte international gehandelt werden, könnten sich unilaterale Festlegungen inländischer Kohlenstoffpreise bzw. nationale Regulierungen zudem negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirken. Daher wären internationale Kohlenstoffpreise und Regulierungen ideal [Abbildung 8].

**Dekarbonisierung der Sektoren, in denen eine Emissionsreduktion besonders schwierig ist, würde erhebliche Auswirkungen auf den Preis von Zwischenprodukten haben.**

|           |                         | Auswirkungen auf Kosten für Zwischenprodukt<br>US\$/% Preissteigerung        |                     |
|-----------|-------------------------|--|---------------------|
| Industrie | Stahl                   | + 120 US\$<br>pro Tonne Stahl  | + 20 %              |
|           | Zement                  | + 100 US\$ pro Tonne Zement<br>(+ 30 US\$ pro Tonne Beton)                   | + 100 %<br>(+ 30 %) |
|           | Kunststoffe             | + 500 US\$<br>pro Tonne Ethylen  | + 50 %*             |
| Transport | Gütertransport (Straße) | Keine Preisauswirkungen  | Keine               |
|           | Schifffahrt             | + 4 Millionen US\$<br>bei typischen Kosten für<br>Massengutfrachter pro Jahr | +110 %              |
|           | Luffahrt                | + 0,3 bis 0,6 US\$<br>pro Liter Kerosin-Äquivalent                           | + 50-100 %          |

\*Unter der Annahme eines Ethylen-Preises von 1000 US\$/Tonne, obwohl der Preis von Ethylen sehr volatil ist.  
Quelle: SYSTEMIQ-Analyse für die Energy Transitions Commission (2018)

Abbildung 8

**Wichtige Handlungsimplicationen für politische Entscheidungsträger:**

- Es sind Kohlenstoffpreise erforderlich, die von Verbrauchern getragen werden können und mit Vorsicht gestaltet sind, um potentielle Beeinträchtigungen der internationalen Wettbewerbsfähigkeit zu vermeiden.
- Sektoren, in denen eine Emissionsminderung besonders schwierig ist, sollten von öffentlichen Förderungen für Innovationen und Investitionen profitieren.
- Erhöhte Energie- und Materialeffizienz sowie die Optimierung der Kreislaufwirtschaft und des Nachfragemanagements – in Verbindung mit Dekarbonisierungstechnologien – sind für die Senkung der wirtschaftlichen Gesamtkosten von entscheidender Bedeutung.

## EIN PORTFOLIO AN ANGEBOTSEITIGEN TECHNOLOGIEN ZUR DEKARBONISIERUNG

Es ist weder möglich noch notwendig, die genaue Balance zwischen den vier wichtigsten Methoden der angebotsseitigen Dekarbonisierung im Voraus festzulegen. Diese Methoden – Elektrizität, Bioenergie, Kohlenstoffbindung und Wasserstoff – werden erforderlich sein, um CO<sub>2</sub>-Neutralität in Sektoren, in denen eine Emissionsminderung besonders schwierig ist, zu erzielen. **Die optimale Balance zwischen diesen wird aber je nach Region variieren und ist abhängig von den jeweilig vorhandenen, natürlichen Ressourcen** (Solar-, Wind- und Wasserressourcen; nachhaltige Biomasse-Ressourcen; Verfügbarkeit von unterirdischen Kohlenstoffspeichern). Zudem werden sich diese angesichts ungewisser technischer und kostenbedingter Trends im Laufe der Zeit entwickeln.

Die öffentliche Politik sollte sich daher in erster Linie auf die Setzung starker Anreize zur Dekarbonisierung konzentrieren und es den Märkten überlassen, die kosteneffektivste Methode für den jeweiligen Sektor zu bestimmen. Es ist jedoch möglich, einige **nahezu sichere Merkmale des Transitionsprozesses hin zu CO<sub>2</sub>-Neutralität zu definieren**, und damit Prioritäten für Investitionen aus öffentlicher und privater Hand zu bestimmen.

### EINE WICHTIGE ROLLE FÜR WASSERSTOFF

Wasserstoff wird sehr wahrscheinlich eine wichtige und kosteneffektive Rolle bei der Emissionseliminierung in mehreren der schwieriger zu dekarbonisierenden Sektoren spielen und möglicherweise auch bei Wohnraumbeheizung und der Flexibilisierung des Energieversorgungsnetzes relevant sein. Selbst wenn Fahrzeuge mit Wasserstoffbrennstoffzellen nur eine geringe Rolle beim leichten Straßentransport spielen, erfordert die Umstellung zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft eine **Steigerung der globalen Wasserstoffproduktion von heute 60 Megatonnen pro Jahr auf 425-650 Megatonnen bis 2050**.

Daher ist die Förderung groß angelegter und kosteneffektiver Produktion von CO<sub>2</sub>-neutralem Wasserstoff anhand einer der folgenden drei Methoden von großer Bedeutung:

- **Elektrolyse mit CO<sub>2</sub>-neutralem Strom:** Diese Methode wird bei sinkenden Strompreisen aus erneuerbaren Energien und Kosten für Elektrolyseausrüstung zunehmend kosteneffektiver. Falls 50% des zukünftigen Wasserstoffbedarfs durch Elektrolyse gedeckt werden würden, würde das Gesamtvolumen der Elektrolyseproduktion um das Hundertfache des heutigen Levels ansteigen und so enormes Potenzial für die Kostenreduktion durch Skalierungsvorteile und Lernkurveneffekte schaffen.
- **Anwendung von Kohlenstoffbindung für die Dampfreformierung von Methan (SMR) und die anschließende Speicherung oder Nutzung von gebundenem CO<sub>2</sub>:** Diese Methode ist vielleicht eine der kosteneffektivsten Formen der Kohlenstoffbindung wegen der hohen Reinheit des CO<sub>2</sub>-Dampfes, der durch die chemische Reaktion produziert wird, falls die dem Verfahren zugeführte Energie elektrisiert ist. Für vollständig dekarbonisierten Wasserstoff aus SMR in Verbindung mit CO<sub>2</sub>-Sequestrierung, müssten Carbon Leakage während der Kohlendioxidabscheidung und Methanmissionen während des gesamten Gas-Wertschöpfungsprozesses minimiert werden. Falls 50% des zukünftigen Wasserstoffbedarfs durch SMR mit Kohlenstoffbindung kraft chemischer Reaktion gedeckt werden würde, würde sich die entsprechende CO<sub>2</sub>-Sequestrierung auf 2-3 Gigatonnen belaufen.
- **Reformieren von Biomethan:** SMR könnte auch CO<sub>2</sub>-neutral durchgeführt werden, wenn Biogas statt Erdgas verwendet werden würde. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass diese Methode eine größere Rolle spielen wird, da es für die gegebenen, limitierten Ressourcen nachhaltiger Biomasse Verwendungen mit höherer Priorität gibt.

## Wichtige Handlungsimplikationen für politische Entscheidungsträger:

- Die Kostenreduktion bei der Elektrolyse ist eine zentrale Innovationspriorität, wobei Kapitalkosten von 220€/Kilowatt anzustreben sind.
- Infrastruktur zur CO<sub>2</sub>-Sequestrierung und -Speicherung ist für eine möglichst CO<sub>2</sub>-neutrale Herstellung von Wasserstoff durch SMR in Verbindung mit CO<sub>2</sub>-Sequestrierung erforderlich.
- Eine zunehmende Kostenreduktion für Brennstoffzellen und Wasserstofftanks hat ebenfalls höchste Priorität.
- Auch der internationale Handel mit Wasserstoff und Ammoniak wird voraussichtlich eine wichtige Rolle spielen, wobei unter Umständen beträchtliche Infrastrukturinvestitionen erforderlich sein werden.

## WEITGEHENDE ELEKTRIFIZIERUNG ZWINGEND ERFORDERLICH

**Bei allen realisierbaren Wegen hin zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft wird der Stromanteil des gesamten Endenergiebedarfs von derzeit 20% bis 2060 auf über 60% steigen.** Demzufolge muss die globale Stromerzeugung von derzeit 20.000 Terawattstunden bis 2050 auf 85.000 bis 115.000 Terawattstunden wachsen, wobei zugleich eine Umstellung von hoch- zu niedrig-emittierenden Energiequellen erforderlich ist.

**Eine konsequente Politik zur Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz sowie zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft und des Nachfragemanagements beim Schwertransport könnte dieses Erfordernis um hilfreiche 25% reduzieren** – in entwickelten Volkswirtschaften sogar um einen höheren Anteil. Gegeben der Größenordnungen der Investitionsherausforderung ist eine Maximierung dieses Potentials von entscheidender Bedeutung.

Eine **sehr schnelle Expansion von CO<sub>2</sub>-neutralem Strom wird jedoch nach wie vor erforderlich sein.** Gemäß unserer Analyse ist diese Ausweitung zwar schwierig, aber technisch und wirtschaftlich machbar:

- **Strom aus erneuerbaren Energien wird zunehmend wettbewerbsfähiger im Vergleich zu Strom aus fossilen Brennstoffen.** Innerhalb von 15 Jahren wird eine Betreibung von Stromversorgungsnetzen möglich sein, bei denen 85-90% des Strombedarfs durch einen Mix aus Wind- und Solarenergie kombiniert mit Batterien als kurzfristiges Backup gedeckt wird; die restlichen 10-15% werden durch bedarfsgesteuerte maximale Erzeugungskapazitäten abgedeckt (beispielsweise nachfragegesteuerte Wasserstoff-, Biomasse- oder fossile Brennstoffe mit Kohlenstoffbindung). Eine dramatische Kostensenkung für Batterien sowie für Strom aus erneuerbarer Energie wird es ermöglichen, solche Energieversorgungsnetze bis 2035 zu Gesamtkosten von 48€/Megawattstunde in den meisten Geographien und von unter 31€/Megawattstunde an den günstigsten Standorten zu betreiben<sup>12</sup>, insbesondere wenn eine adäquate Marktgestaltung existiert [[Abbildung 9](#)]. Diese sind geringer als derzeitige, konventionelle Elektrizitätskosten.
- **Insgesamt gibt es auf globalem Level zweifellos ausreichend Land, um Stromerzeugung aus erneuerbarer Energie in der erforderlichen Größenordnung zu unterstützen, jedoch sind regionale Unterschiede groß.** Bei günstigen geographischen Bedingungen, wie z.B. im Nordwesten Chinas, im Mittleren Westen der USA und im Nahen Osten, könnte Strom aus erneuerbarer Energie zu geringen Kosten und in Mengen, die den örtlichen Bedarf übersteigen, produziert werden. An weniger günstigen Standorten mit einer höheren Populationsdichte oder weniger günstigen erneuerbaren Ressourcen, muss wohl auf

<sup>12</sup> SYSTEMIQ-Analyse für die Energy Transitions Commission (2018), basierend auf der Climate Policy Initiative für die Energy Transitions Commission (2017), *Low-cost, low-carbon power systems*

CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequellen zurückgegriffen werden, die weniger landintensiv sind und höhere Kapazitätsfaktoren haben (z.B. Nuklearenergie oder fossile Brennstoffe mit Kohlenstoffbindung) oder auf Stromimporte (mittels Überlandleitungen über weite Entfernungen oder in Form von Wasserstoff oder Ammoniak).

- **Eine rasche Erhöhung der Geschwindigkeit der Bereitstellung erneuerbarer Energien ist erforderlich.** Um den Strombedarf von 100.000 Terawattstunden bis zum Jahr 2050 mit 90% erneuerbaren Energien zu decken, müsste die Bereitstellungsrate von Solar- und Windenergie um mehr als 10% pro Jahr gesteigert werden (dies bedeutet eine Verdopplung alle sieben Jahre). Dies wird zudem eine Stärkung der Stromnetze erfordern.



Abbildung 9

Falls die Elektrifizierung vor einer ausreichenden Energie-Dekarbonisierung erfolgen würde, sodass Strom weiterhin primär mittels fossiler Kraftstoffe produziert werden würde, könnten CO<sub>2</sub>-Emissionen kurzfristig ansteigen. Gemäß unserer Analyse könnte diese Gefahr bei Land- und Seeverkehr, sowie bei den meisten industriellen Anwendungen in denjenigen entwickelten Volkswirtschaften begrenzt sein, in welchen die Kohlenstoffintensität des Stroms unter 750g CO<sub>2</sub> pro Kilowattstunde liegt. Jedoch sind niedrigere Kohlenstoffintensitäten erforderlich, bevor eine Umstellung auf Wasserstoff, Ammoniak und synthetische Kraftstoffe oder auf Elektroheizung zu Emissionsminderung führen wird. Dagegen könnte die sofortige Elektrifizierung in einigen kohleabhängigen, sich entwickelnden Volkswirtschaften zu beträchtlichen Kohlenstoffemissionen führen – zum Beispiel in Indien, wo die Kohlenstoffintensität des Stroms bei über 1000g CO<sub>2</sub> pro Kilowattstunde liegt. **Rapider Fortschritt bei der Dekarbonisierung von Energie und eine umsichtige Koordination des Tempos für die Dekarbonisierung des Stroms und für Elektrifizierung sind daher dringend notwendig.**

## Wichtige Handlungsimplikationen für politische Entscheidungsträger:

- Politikmaßnahmen zur Dekarbonisierung der Energie sollten einen beträchtlichen Anstieg der Energienachfrage einkalkulieren und eine Ausweitung der Bereitstellung von Strom aus erneuerbaren Energien beschleunigen.
- Nationale Pläne zur Dekarbonisierung, wie sie beispielsweise von NDCs beschrieben werden, sollten eine integrierte Vision der Energiedekarbonisierung und Elektrifizierung festlegen, damit sichergestellt wird, dass die steigende Energienachfrage mit CO<sub>2</sub>-neutraler Energie gedeckt wird.

## EINE PRIORISIERTE UND STRENG REGULIERTE VERWENDUNG VON BIOMASSE

Biomasse – als Energiequelle zur Wärmeerzeugung, als Reduktionsmittel bei Stahlproduktion oder als Rohmaterial bei Chemieproduktion – könnte prinzipiell in einzelnen, schwieriger dekarbonisierbaren Sektoren eine Rolle spielen. Biomasse könnte beim Einsatz in Strom- oder Wärmeerzeugung, oder in der Industrie, mit Kohlenstoffbindung kombiniert werden. Dadurch könnten potenziell negative Emissionen erzeugen werden. Auch Holz könnte als alternatives, kohlenstoffarmes Baumaterial verwendet werden.

Jedoch **muss der Einsatz von Biomasse angesichts der Konkurrenz hinsichtlich Landnutzung, insbesondere mit der Landwirtschaft, eingeschränkt werden**. Dafür muss Biomasse-Herstellung auf Land basieren, das nicht anderweitig für Nahrungsmittelherstellung oder Kohlenstoffsequestrierung verwendet wird, und die Benutzung mit notwendiger Erhaltung von Biodiversität und Ökosystemen vereinbar sein, insbesondere mit der Vermeidung von Entwaldung. Zudem ist zu berücksichtigen, dass Bioenergie typischerweise weniger als 1% der Energie produziert, die durch Solarenergie pro Hektar erzeugt werden kann. Dies macht - sofern verfügbar und technisch machbar - strombasierte Lösungen effektiver.

Schätzungen zum Angebot nachhaltiger Biomasse variieren stark, doch selbst konservative Annahmen gehen davon aus, dass mindestens **70 EJ nachhaltige Biomasse pro Jahr bis 2050 zur Energieerzeugung und als Rohmaterial verfügbar sein** könnten. Diese Zahl setzt sich zusammen aus 10-15 EJ kommunaler Abfälle, 46-95 EJ landwirtschaftlicher Abfälle und Verarbeitungsrückständen und 15-30 EJ Holzernteabfälle<sup>13</sup>. Bei diesen Schätzungen bleibt die Biomasse-Produktion von solchen Pflanzen außer Betracht, die speziell für die Energieerzeugung angebaut werden, ob in Form von Ölpflanzen (z. B. Soja) oder in Form von Waldnutzpflanzen (z.B. schnellwachsende Weiden oder Pappeln).

Die größten Unsicherheiten liegen beim Angebot von lignozellulosehaltigen Materialien: Einerseits könnten diese in nachhaltiger Weise von Waldnutzpflanzen gewonnen werden, etwa durch massive Aufforstungsprogramme insbesondere von degradiertem Land in tropischen Regionen; andererseits ist das Angebot auf die Verfügbarkeit von Winterzwischenfrüchten und algenbasierten Produkten zurückführbar. Mehrere Faktoren könnten die Menge an verfügbarer nachhaltiger Biomasse vermindern, insbesondere reduzierte Ernteerträge aufgrund des Klimawandels.

Ein nachhaltiges Angebot von 70 EJ (oder sogar 100 EJ) wäre unzureichend, um den gesamten potenziellen Bedarf der einzelnen Sektoren (Energie, Industrie und Transport) nach Biomasse zu befriedigen. **Die Verwendung von Biomasse muss sich daher auf die Sektoren konzentrieren, in denen alternative Methoden zur Dekarbonisierung limitiert sind:**

- **Der Luffahrt scheint der Sektor mit der höchsten Priorität zu sein**, da für die Dekarbonisierung von Langstreckenflügen ein CO<sub>2</sub>-neutrales Äquivalent zu Kerosin von entscheidender Bedeutung ist. Bis zu maximal 42 EJ Biomasse wäre für eine vollständige

<sup>13</sup> IEA (2017), *Technology roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*

Dekarbonisierung notwendig. Dies könnte reduziert werden, falls synthetische Kraftstoffe eingesetzt, Energieeffizienz erhöht und Nachfragemanagement verbessert wird.

- **Der Sektor mit der zweithöchsten Priorität ist wohl der Kunststoffsektor**, in dem Bio-Rohmaterialien zur Kompensation von nach Nutzungsdauer entstehenden Emissionen essentiell sind, außer wenn Kunststoffe nach Ende ihrer Nutzungsdauer recycelt oder sicher deponiert werden. Bio-Rohmaterialien könnten fossile Kraftstoffe nicht vollständig ersetzen: 28 EJ Biomasse sind zum Decken von 30% des Rohmaterialbedarfs notwendig. Die Strategie für die Kunststoff-Dekarbonisierung muss daher zwei Ansätze miteinander kombinieren: Ein möglichst vollständiger Wandel hin zu einem Kreislaufwirtschaftsmodell mit CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in Form einer dauerhaften und (austritts-)sicheren Aufbewahrung von Kunststoffen; und eine möglichst eingeschränkte Verwendung von Bio-Rohmaterialien, um die unvermeidbaren Verluste innerhalb der Wertschöpfungskette zu kompensieren.
- Falls nicht durch rigide Nachhaltigkeitskriterien beschränkt, könnte die **größte Nachfrage nach Biomasse** nicht von den in diesem Bericht behandelten, schwieriger dekarbonisierbaren Sektoren kommen, sondern von **Wohnraumbeheizung und Stromerzeugung** (wo in Verbindung Kohlenstoffbindung und -sequestrierung negative Emissionen entstehen könnten)<sup>14</sup>. Daher ist eine Bedarfsminimierung durch Förderung eines größtmöglichen Fortschritts bei Energiespeicherungstechnologien und intelligentem Nachfragemanagement von entscheidender Bedeutung.
- Im Gegensatz dazu, **spielen Biokraftstoffe/Biomasse keine entscheidende Rolle bei der Förderung der Dekarbonisierung des Schwertransports auf der Straße, des Seetransports und in anderen Industriesektoren**, in denen andere Methoden zur Dekarbonisierung verfügbar sind.

**Biomasse, Biogas und Biokraftstoffe sind bei Verwendung höchstwahrscheinlich teurer** als fossile Kraftstoffe. Kohlenstoffpreise und -regulierungen werden daher essentiell und angemessen sein, um deren Benutzung wirtschaftlich zu machen. In manchen Anwendungen, wo sie natürlicherweise aus dem Markt gedrängt würden, könnten Biomasse-basierte Lösungen auch teurer als alternative Pfade der Emissionsminderung sein, wie etwa Elektrifizierung oder Wasserstoff.

---

<sup>14</sup>Die aufgeführten Argumente legen nahe, dass bis zu 28EJ an Biomasse zugeführt werden, wenn Biogas eine bedeutende Rolle bei der Beheizung von Wohnräumen spielt, und bis zu 34EJ, wenn die Stromerzeugung aus Biomasse nur 4% der weltweiten Stromversorgung liefert, um den Spitzenlastbedarf zu decken

### Wichtige Handlungsimplikationen für politische Entscheidungsträger:

- Strenge Regulierungen zur Biomasse-Nachhaltigkeit sind unerlässlich. Hierbei werden vermutlich die meisten Energiepflanzen ausgeschlossen, welche oft mit Landwirtschaft und Ökosystemleistungen in Konkurrenz stehen. In gemäßigtem Klima gibt es einige Ausnahmen, wie Winterzwischenfrüchte.
- Die Entwicklung und Kostenreduktion von wirklich nachhaltigem Bio-Kerosin für Luftfahrt sowie von Bio-Rohmaterialien für Kunststoffe haben eine hohe Priorität hinsichtlich der Unterstützung für Innovationsentwicklung.
- Unterstützung vom öffentlichen Sektor für die Entwicklung von Biomasse sollte von Sektoren mit niedriger zu hoher Priorität verlagert werden, außer wenn lokale Bedingungen ein klares, nachhaltiges Angebot für ein großes Portfolio an Anwendungen bieten.
- Von entscheidender Bedeutung ist die Entwicklung von Erzeugungskapazitäten zur Spitzenbedarfsdeckung, die nicht auf Biomasse basieren, wie z.B. Energiespeicherungsoptionen zur Stromversorgung und Wohnraumbeheizung.
- Effizientere Bioraffinerie-Verfahren sind entscheidend, um ab einem bestimmten Level der Primärversorgung einen höheren Einsatz von Bioenergie und Bio-Rohmaterialien zu ermöglichen.

## EINE WESENTLICHE, JEDOCH EINGESCHRÄNKTE ROLLE FÜR KOHLENSTOFFBINDUNG

Aufgrund des starken Kostenrückgangs für erneuerbare Energien innerhalb der letzten 10 Jahre wird Kohlenstoffbindung wohl **vermutlich eine relativ kleine Rolle im Energiesektor** spielen, möglicherweise eine komplementäre Lösung für variable erneuerbare Energien durch Bereitstellung lieferbarer, kohlenstoffarmer Elektrizität. Doch ohne Anwendung von Kohlenstoffbindung und -sequestrierung wird das Erreichen von CO<sub>2</sub>-Neutralität in schwieriger dekarbonisierbaren Industriesektoren wahrscheinlich unmöglich, und mit Sicherheit teurer sein: Es scheint womöglich **die einzige Methode zur Erreichung vollständiger Dekarbonisierung der Zementproduktion** zu sein, außer ein Durchbruch in der Zementchemie eliminiert die Verfahrensemissionen. Zudem wird es an manchen Orten wohl die kosteneffektivste Methode zur Dekarbonisierung der Stahl-, Chemie- und Wasserstoffproduktion sein.

Doch **gegenwärtig gibt es keinen Konsens über den notwendigen Umfang der Kohlenstoffbindung**. Mehrere Szenarien zur Erreichung der Pariser Klimaziele gehen davon aus, dass Kohlenstoffbindung und -sequestrierung bis 2100 Emissionen um etwa 18 Gigatonnen (oder mehr) jährlich vermindern könnten, bei Anwendung auf Biomasse-basierten Verfahren, die beträchtliche negative Emissionen produzieren. Es gibt Bedenken, dass Annahmen über sehr hohe Volumen dazu führen, die Fortführung großvolumiger Produktion auf Basis fossiler Kraftstoffe zu rechtfertigen. Zudem werden zuweilen Befürchtungen geäußert, dass die unterirdische Speicherung von Kohlenstoff nicht sicher bzw. nicht dauerhaft effektiv sei.

Daher ist es von entscheidender Bedeutung, einen Konsens zu finden hinsichtlich der realistischen und notwendigen Rolle von Kohlenstoffbindung, der jeweiligen Rolle der Kohlenstoffspeicherung sowie der Kohlenstoffnutzung in CO<sub>2</sub>-basierten Produkten. Die ETC ist folgender Ansicht:

- Eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft kann auch ohne große Mengen von Kohlenstoffbindung (z. B. 18 Gigatonnen pro Jahr) erreicht werden, die manchen Modellen zugrunde liegen. Jedoch wird **ein geringer Umfang an Kohlenstoffbindung (z. B. etwa 5-8 Gigatonnen pro Jahr)** höchstwahrscheinlich ein notwendiger und kosteneffektiver Teil einer Gesamtstrategie zur Dekarbonisierung sein.
- **Rund 1-2 gebundener Gigatonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr könnten dann voraussichtlich in CO<sub>2</sub>-basierten Produkten verwendet werden, die eine langfristige Speicherung ermöglichen:** Hierbei bieten Beton, Betonzuschläge und Kohlenstofffasern das größte Potential. Dies impliziert eine potenzielle Synergie zwischen Kohlenstoffbindung in Zementwerken und dessen Verwendung innerhalb der Betonproduktion.
- **Kohlenstoffspeicherung ist jedoch in einem gewissen Umfang voraussichtlich erforderlich** – eine jährliche Speicherung von 3-7 Gigatonnen CO<sub>2</sub> – und gemäß bester Expertenmeinung – einschließlich jene vom IPCC – kann Kohlenstoffspeicherung durch effektive Regulierung ausreichend gesichert werden<sup>15</sup>.
- **Um diese Volumen der Kohlenstoffbindung bis 2050 zu erreichen, ist eine signifikante Beschleunigung bei der Geschwindigkeit der Bereitstellung erforderlich.** Hierzu müssen Regierungen eine aktive Rolle übernehmen, (i) zum Aufbau gesellschaftlicher Akzeptanz des Transports und der Speicherung von Kohlenstoff, basierend auf unabhängigen wissenschaftlichen Nachweisen für deren Sicherheit; (ii) um wirtschaftliche Rentabilität von Kohlenstoffbindung und -speicherung durch adäquate Preisgestaltung für Kohlenstoff sicherzustellen und (iii) Planung und Regulierung der Bereitstellung von Infrastrukturen für Kohlenstofftransport und -speicherung zu gestalten. Derzeit werden diese Bedingungen noch nicht erfüllt. Sofortige und wirkungsvolle

<sup>15</sup> IPCC (2005), *Carbon Dioxide Capture and Storage*; IPCC (2014), *Mitigation of climate change*

kollektive Maßnahmen von politischen Entscheidungsträgern und Industrien sind erforderlich, um diese Rahmenbedingungen innerhalb der nächsten 10 Jahren sicherzustellen.

#### **Wichtige Handlungsimplikationen für politische Entscheidungsträger:**

- Kohlenstoffbindung und Technologien für den Kohlenstoffverbrauch in kommerziellem Maßstab zu entwickeln, insbesondere in der Zement-Beton-Wertschöpfungskette, sollte mit höchster Innovationspriorität verfolgt werden.
- Kohlenstoffpreise werden eine entscheidende Rolle für die Förderung von Kohlenstoffbindung und -Sequestrierung jeglicher Form einnehmen.
- Damit die unterirdische Kohlenstoffspeicherung in das Lösungsportfolio aufgenommen wird, liegt es an Regierungen, Folgendes umzusetzen:
  - Ausreichend strikte Regulierungen des Kohlenstofftransports und -speicherung, um gesellschaftliche Akzeptanz zu erlangen;
  - Planung und Förderung der Bereitstellung von Infrastrukturen für Kohlenstofftransport und -speicherung.
- Wenn unterirdische Kohlenstoffspeicherung nicht gefördert wird, sollten Regierungen Folgendes angehen:
  - Planung einer rascheren und effektiveren Bereitstellung erneuerbarer Energien und elektrizitätsbasierter Lösungen für die Industrie;
  - Markteinführung kohlenstoffarmer Materialien zur Substitution von Zement;
  - Markteinführung von Technologien zum Abbau von Kohlenstoffdioxid zur Behandlung verbleibender Kohlenstoffemissionen.

#### **DER OPTIMALE WEG ZU EINER CO<sub>2</sub>-NEUTRALEN WIRTSCHAFT**

Der optimale Weg zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft wird den Einsatz aller Dekarbonisierungshebel erfordern. Im Hinblick auf die Gesamtbilanz wird Elektrifizierung die größte Rolle spielen, und bis 2050 rund 65% des Endenergiebedarfs abdecken, wobei Elektrizität wohl auch zur Produktion eines beträchtlichen Anteils von Wasserstoff eingesetzt werden wird. Rund 85-90% des Stroms werden wiederum durch erneuerbare Energien oder andere CO<sub>2</sub>-neutrale Quellen erzeugt, wobei nicht mehr als 10-15% aus Biomasse oder fossilen Kraftstoffen mit Kohlenstoffbindung stammen. Die Primärenergienachfrage würde erheblich geringer ausfallen, falls Gelegenheiten in den Bereichen Energieeffizienz, Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Nachfragemanagement beim Transport wahrgenommen würden. [Abbildung 10]

## Strom aus erneuerbaren Quellen und Nuklearenergie könnte ~60 % der primären Energienachfrage decken.

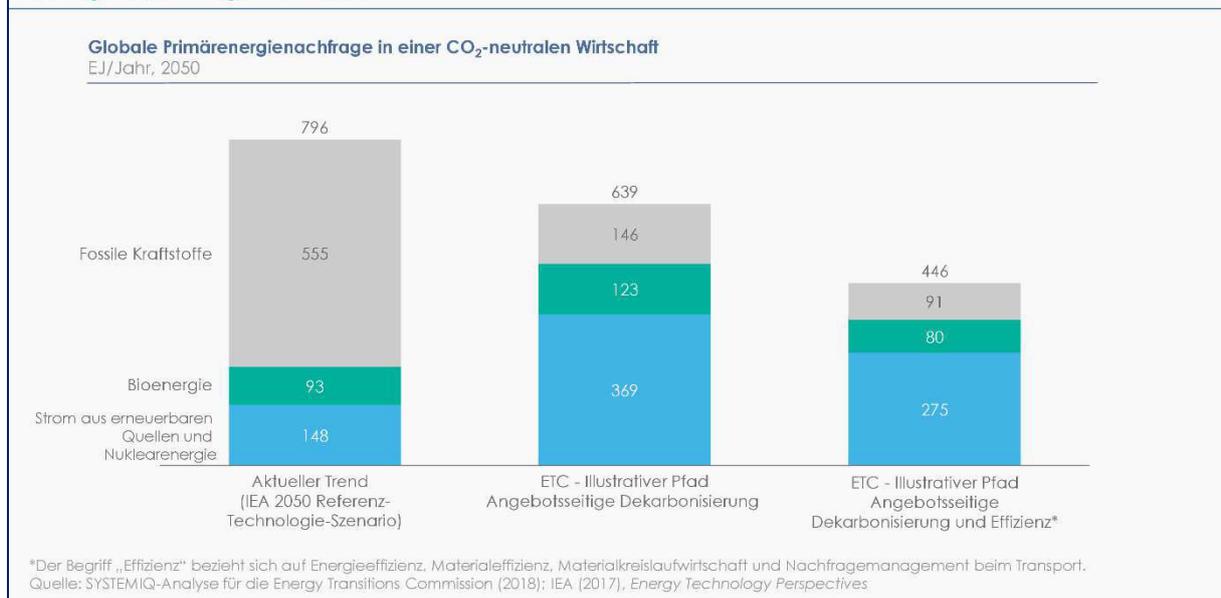


Abbildung 10

Aufgrund großer Unterschiede bei relevanten natürlichen Rohstoffvorkommen, wird die optimale Balance der Dekarbonisierungsmethoden über Standorte hinweg variieren:

- **Wegen signifikanten Varianzen bei Solar- und Windressourcen** werden einige Länder weit über 65% des Endenergiebedarfs durch lokal produzierte, günstige erneuerbare Energien decken können, während andere Länder gezwungenermaßen auf andere CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequellen oder Energieimporte angewiesen sein werden. Auch die Kosten zur Stromerzeugung durch erneuerbare Energien werden erheblich variieren.
- **Vorhandene Biomasse-Ressourcen pro Kopf und damit verbundene Kosten sind stark abhängig von jeweiligen, regionalen Bedingungen.** Hier liegt die Entwicklung eines internationalen Handels von bioraffinierten Produkten für Luftfahrt und Kunststoffproduktion nahe. Zudem wird - je nach Standort - das Ausmaß der Biomasse-Nutzung in anderen (lokalisierten) Wirtschaftssektoren, wie zum Beispiel Wärme- und Stromerzeugung, sehr unterschiedlich ausfallen.

**Im Falle von unterirdischer Kohlenstoffspeicherung spiegeln die enormen regionalen Unterschiede hinsichtlich der bekannten Größenordnung verfügbarer Speicherkapazitäten teilweise den gegenwärtig limitierten Kenntnisstand in mehreren Geographien (insbesondere Afrika) wider.** Doch auch nach Abschluss einer umfassenden Untersuchung hierzu, sind große regionale Varianzen hinsichtlich der verfügbaren Speicherkapazitäten zu erwarten

## B. DER ÜBERGANG ZU CO<sub>2</sub>-NEUTRALITÄT IN INDUSTRIE UND TRANSPORT

Unsere Analyse zeigt, dass die Sektoren, in denen eine Emissionsminderung besonders schwierig ist, bis 2050 CO<sub>2</sub>-Neutralität erreichen können, und dies zu geringen Kosten für Weltwirtschaft und Endverbraucher. Doch der Weg hin zu Netto-Null-CO<sub>2</sub>-Emissionen ist ebenso relevant wie das Endziel. Daher ist es essentiell,

- **die Komplexitäten zu erkennen, die das realisierbare Tempo des Überganges bestimmen;**
- **das Ausmaß der Herausforderung der Dekarbonisierung durch Verbesserungen der Energieeffizienz und beim Nachfragemanagement zu reduzieren;**
- **eine angemessene Rolle für Übergangslösungen zu bestimmen**, insbesondere nicht-dekarbonisiertes Gas als Übergangskraftstoff und Offsets ('Ausgleichszahlungen') als transitionäre Lösung zur Emissionsminderung.

Technische, wirtschaftliche und institutionelle Herausforderungen nach Sektoren

Drei Kategorien von Herausforderungen bezüglich der Transition sind zu vermerken: Technische, wirtschaftliche und institutionelle Herausforderungen.

### TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN:

- **Viele der relevanten Technologien sind derzeit noch nicht marktreif.** Während Elektro-LKWs bis 2030 kostenwettbewerbsfähig sein könnten, wird die Elektrifizierung von Zementöfen wohl erst 10 Jahre später marktfähig sein. Bei wasserstoffbasierten Industrieverfahren sind ebenfalls signifikante Entwicklungen notwendig. Daher ist die Beschleunigung der Entwicklung sowie Bereitstellung von Schlüsseltechnologien im erforderlichen Umfang von entscheidender Bedeutung.
- **Vollständige Emissionseliminierung über den gesamten Lebenszyklus von Kunststoffen hinweg scheint eine besondere Herausforderung darzustellen**, da dies nicht nur die Eliminierung der bei der Produktion entstehenden Emissionen erfordert, sondern auch derjenigen, die nach Ende der Nutzungsdauer anfallen. Aufgrund limitiert verfügbarer, nachhaltiger Biomasse wird eine vollständige Substitution von fossilen Kraftstoffe durch Bio-Rohmaterialien nicht möglich sein. Daher ist es entscheidend, sicherzustellen, dass be- und entstehende, auf fossilen Kraftstoffen basierende Kunststoffe **mechanisch bzw. chemisch recycelt werden, sowie eine sichere Lagerung der Festkunststoffe nach Ende ihrer Nutzungsdauer existiert.**
- In den meisten Fällen, **werden Technologien zur Kohlenstoffbindung etwa 80-90% des CO<sub>2</sub>-Stroms binden**, während die übrigen 10-20% nach wie vor in die Atmosphäre abgegeben werden. Die Entwicklung von Kohlenstoffbindungs-Technologien mit höherer Bindungsrate ist zu priorisieren, jedoch werden in negative Emissionen von Landnutzung oder BECCS voraussichtlich in einem gewissen Maße erforderlich sein, um diese Residualemissionen zu kompensieren.

## WIRTSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN:

- Da die meisten Pfade der Dekarbonisierung Nettokosten verursachen werden, **werden Marktkräfte nicht allein Fortschritt vorantreiben**. Konsequente Politikmaßnahmen – in Form von Regulierungen und finanzieller Förderung – müssen Anreize für eine rasche Dekarbonisierung schaffen.
- Es stellt sich als besonders schwierig heraus, **heute ausreichend starke finanzielle Anreize zu setzen**, die die Suche optimaler Dekarbonisierungspfade initiieren und fördern, ohne zugleich eine einseitige Last auf diejenigen Sektoren zu legen, bei denen Technologien zur vollständigen Dekarbonisierung noch nicht vorhanden sind.
- **In der Schwerindustrie verzögert die sehr lange Nutzungsdauer der Anlagen den Einsatz neuer Technologien**, außer wenn politische Entscheidungsträger attraktive Anreize setzen, die eine frühzeitiges Abschreiben der Anlagen begünstigen würden. Beispielsweise würde bei der Stahlproduktion die Umstellung von einer Reduktion durch Hochofen auf eine direkte, wasserstoffbasierte Reduktion den Abriss bestehender Anlagen noch vor Ende ihrer üblichen Nutzungsdauer erfordern.
- **Hohe Anfangsinvestitionen können ein Hindernis für den Fortschritt darstellen**, selbst wenn die Kohlenstoffpreise eine Umstellung auf CO<sub>2</sub>-neutrale Technologien theoretisch wirtschaftlich machen; dies ist insbesondere in Sektoren oder bei Unternehmen der Fall, die mit geringen Margen konfrontiert sind. Daher könnte eine Unterstützung in Form von direkten, öffentlichen Investitionen (beispielsweise durch Kreditsicherheiten oder rückzahlbare Vorschüsse) erforderlich sein.
- Obwohl die Umstellung auf eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft insgesamt vorteilhaft sein wird, wird es unvermeidbar Gewinner und Verlierer geben, und lokale wirtschaftliche Entwicklungen sowie die Beschäftigung in einigen Regionen beeinträchtigen. Zudem könnte der Effekt auf Endverbraucher-Preise - auch wenn insgesamt in begrenztem Ausmaß - größere Auswirkungen auf Haushalte mit niedrigem Einkommen haben, insbesondere in Entwicklungsländern. **Die Politik sollte diese Verteilungseffekte antizipieren und durch gerechte Übergangstrategien kompensieren.**

## INSTITUTIONELLE HERAUSFORDERUNGEN:

- **Die derzeitigen Innovationssysteme sind schwach verknüpft**, mit geringer Koordination von öffentlicher und privater Forschung und Entwicklung und einem Mangel an internationalen Foren, die eine auf schwieriger zu dekarbonisierbaren Sektoren fokussierte Innovations-Agenda verfolgen.
- In Sektoren, die dem internationalen Wettbewerb ausgesetzt sind, **könnten sich nationale Kohlenstoffpreise oder Regulierungen negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirken und zu einer Verschiebung von Produktionsstandorten führen**. Daher ist eine Koordination der internationalen Politik, nachgelagerte Besteuerungen und/oder Grenzsteuerausgleiche, oder eine freie Allokation innerhalb von Emissionshandels- oder Kompensationssystemen erforderlich (in Verbindung mit immer weiter verbreiteten Benchmarking-Standards für Technologien).
- **Einige Industriebranchen, wie zum Beispiel die Schifffahrt und das Bauwesen, sind so fragmentiert**, dass Anreize gespalten sind. Selbst kosteneffektive Technologien zur Effizienzsteigerung und Praktiken der Kreislaufwirtschaft können nicht einfach bereitgestellt und umgesetzt werden. Innovative Politikmaßnahmen zur Stärkung von Anreizen sind notwendig, wie beispielsweise auf Hafenebene auferlegte Regulierungen oder Recyclingpflichten für bestimmter Materialien.

## IMPLIKATIONEN FÜR INDUSTRIE UND SCHWERTRANSPORT

Aufgrund dieser technischen, wirtschaftlichen und institutionellen Herausforderungen werden sich die Übergangspfade je nach Sektor erheblich unterscheiden:

- **In den industriellen Sektoren wird der Fortschritt hin zu einer vollständigen Dekarbonisierung unvermeidbar mehrere Jahrzehnte dauern.** Die Politik muss daher überzeugende Anreize für langfristige Änderungen setzen, die weit im Voraus festgelegt werden, ob über die Preisgestaltung für Kohlenstoff, Vorschriften oder finanzielle Zuschüsse. Proaktive Handlungen seitens der Industrie innerhalb des nächsten Jahrzehnts würden Kosten nachfolgender Dekarbonisierungsbemühungen reduzieren.
- In den **Transportsektoren** sind Übergangsmodelle weniger kompliziert:
  - Beim **Schwertransport** könnten die viel kürzeren Nutzungszeiten der Anlagegüter eine **rapide Dekarbonisierung ermöglichen** (beispielsweise 15 statt 30 Jahre), sobald alternative Fahrzeuge (ob mit Batterie oder Wasserstoffbrennstoffzelle) zum Zeitpunkt der Neuanschaffung kostenwettbewerbsfähig werden.
  - **Beim Langstrecken-Schiffahrt- und Flügen** stellt die Langlebigkeit der hier verwendeten Motoren kein Hindernis für eine rasche Transition dar, da der wahrscheinliche Weg zur vollständigen Dekarbonisierung über die **Nutzung von CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffen in bestehenden Motoren** vollzogen werden kann. Die Übergangsgeschwindigkeit wird daher eher von den relativen Kosten von CO<sub>2</sub>-neutralen vs. herkömmlichen Kraftstoffen bestimmt<sup>16</sup>.

## VERRINGERUNG DER HERAUSFORDERUNGEN DURCH EFFIZIENZVERBESSERUNG UND NACHFRAGEMANAGEMENT

Aufgrund der erforderlichen Zeitspanne zur Erreichung einer angebotsseitigen Dekarbonisierung, insbesondere in der Industrie, sind **Effizienzverbesserungen und nachfrageseitige Reduktionen entscheidend: So können einerseits kurzfristige Emissionsminderungen erreicht werden, andererseits auch die Kosten für langfristige Dekarbonisierung gesenkt werden.** Hierfür wäre das Volumen von primärer, industrieller Produktion oder Mobilitätsdienstleistungen, auf die Technologien zur angebotsseitigen Dekarbonisierung angewendet werden müssen, zu reduzieren [Abbildung 11].

**Energie-Effizienzverbesserungen** werden bei Schiff- und Luftfahrt insbesondere wichtig sein, wenn ein geringerer Kraftstoffverbrauch pro Kilometer Strafkosten für die Nutzung CO<sub>2</sub>-neutraler Kraftstoffe und die Beanspruchung eines beschränkten Angebots nachhaltiger Biokraftstoffe reduzieren könnte.

Das Potenzial durch Nachfragemanagement fällt für Transport- und Industriesektor unterschiedlich aus:

- **Im Transport-Sektor hat die Verkehrsverlagerung** größtes Potenzial, beim Frachttransport von der Straße auf die Schiene, und bei der Passagierbeförderung auf Kurzstrecken vom Flugzeug auf Hochgeschwindigkeitszüge. Insgesamt wird das Gesamtpotenzial jedoch voraussichtlich nicht mehr als 20% betragen.
- **Dagegen, könnte in der Industrie eine höhere Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft die CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit bis 2050 um 40% reduzieren** – in entwickelten Ländern

---

<sup>16</sup> In der Schifffahrt sind einige Nachrüstungen erforderlich, um die Ausrüstung für die Handhabung und Lagerung von Kraftstoff an die Verwendung von Ammoniak oder Wasserstoff anzupassen.

sogar um 55%, wobei Lieferketten für Kunststoffe und Metalle hier die größten Möglichkeiten bieten.

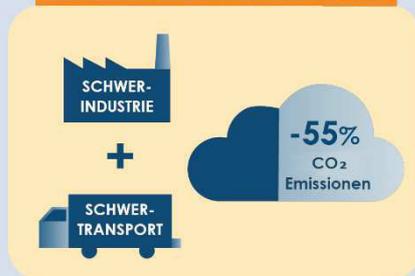
Die meisten Technologien, um eine potentielle, nachfrageseitige Emissionsminderung zu erreichen, sind bereits verfügbar. Eine umfangreiche Bereitstellung wird vermutlich zu Kostenreduzierungen führen, beispielsweise in der Recycling-Industrie; jedoch werden auch **größere Änderungen beim Produktdesign, bei der Industriepraxis und bei rechtlichen Rahmenbedingungen von entscheidender Bedeutung sein**, um diese Möglichkeit zu realisieren.

- **Um eine effektivere Materialkreislaufwirtschaft zu realisieren, ist eine verbesserte Koordination zwischen den unterschiedlichen Unternehmen entlang der Wertschöpfungsketten in Herstellung, Automobilindustrie und Bauwesen notwendig.** Tatsächlich erfordert ein hochqualitatives Recycling neue, holistischere Ansätze beim Produktdesign, bei der Demontage nach Ende der Nutzungsdauer und bei der Materialtrennung. Dies wird jedoch nicht ohne entsprechende gesetzliche Regulierungen umgesetzt werden, insbesondere durch eine erweiterte Herstellerverantwortung.
- Auch eine **höhere Logistikeffizienz wird auf eine bessere Koordination zwischen den Unternehmen angewiesen sein**, die durch Big-Data-Computing ermöglicht wird. Dagegen wird eine **Verkehrsverlagerung eine verbesserte Infrastruktur für den öffentlichen Verkehr**, insbesondere des Schienenverkehrs, erfordern. Finanzielle Anreize müssen geschaffen werden, um sowohl bei der Passagierbeförderung, als auch beim Frachttransport Veränderungen herbeizuführen.

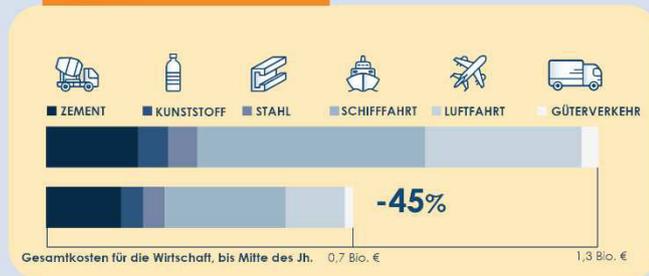
## WARUM ENERGIEEFFIZIENZ UND NACHFRAGEMANAGEMENT SO WICHTIG SIND

IN DEN SEKTOREN, IN DENEN EINE EMISSIONSREDUKTION BESONDERS SCHWIERIG IST, KÖNNEN ENERGIEEFFIZIENZ UND NACHFRAGEMANAGEMENT FOLGENDES BEWIRKEN:

### REDUZIERUNG DER CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN



### REDUZIERUNG DER KOSTEN



### REDUZIERUNG DES UMFANGS, IN DEM TECHNOLOGIEN ZUR DEKARBONISIERUNG IMPLEMENTIERT WERDEN MÜSSEN:

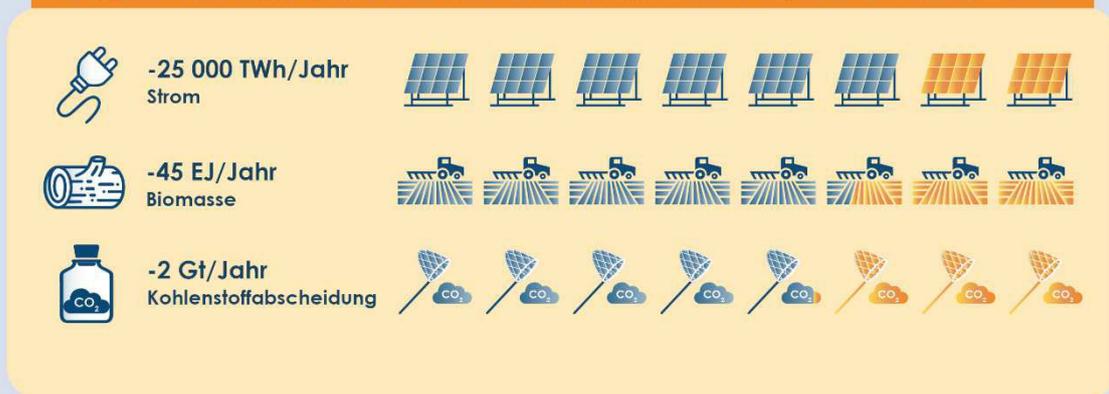


Abbildung 11

## NUTZUNG VON ÜBERGANGSLÖSUNGEN: GAS UND OFFSETS

Die angemessene Nutzung dieser Lösungen wird je nach Sektor variieren, und ist abhängig davon, wann eine endgültige Lösung kommerziell verfügbar sein wird.

Übergangslösungen sind daher **insbesondere für die Schwerindustrie geeignet, wo viele CO<sub>2</sub>-neutrale Lösungen derzeit noch nicht marktfähig sind**. Beim **Schwertransport werden sie dagegen eine untergeordnete Rolle** spielen, da der Übergang zu Elektrofahrzeugen (etwa beim Güterverkehr) oder zu Bio- bzw. synthetischen Kraftstoffen (beim Schiff- und Luftfahrt) relativ einfach ist.

## GAS ALS ÜBERGANGSKRAFTSTOFF

Da **Gasverbrennung typischerweise rund 50% weniger Emissionen als Kohle produziert** - gegeben der notwendigen Bedingung strenger Kontrollen von Methan-Emissionen, könnte Emissionen kurzfristig durch die Umstellung von Kohle auf Gas bei ansonsten kaum veränderten

Produktionsverfahren/-mitteln im Prinzip beträchtlich reduziert werden. **Die Umstellung von Öl auf Gas würde nur in einem beschränkteren Ausmaß zu Reduktionen führen (5-20%).** Jedoch können Klimavorteile erheblich gemindert werden bzw. sogar gänzlich verschwinden, falls in der Gas-Wertschöpfungskette mehr als 1-3% Methan entweichen (abhängig von jeweiliger Anwendung).

- **In der Industrie könnte das Umstellen von Kohle auf Gas ein erhebliches Potenzial bieten,** insbesondere in Industrien, wo Kohle noch als Wärmequelle verwendet wird (z.B. Zement), und in Ländern, in denen Kohle noch als Rohmaterial bei der Chemieproduktion verwendet wird (z.B. China). Dieses Potenzial könnte jedoch aufgrund von limitierter, inländischer Gasversorgung eingeschränkt sein, insbesondere in China und Indien.
- **Beim Transport ist die optimale Rolle von Gas eingeschränkt.** Beim Güterverkehr könnten CNG und beim Seetransport LNG für den Übergang limitiert eingesetzt werden, wenn Bestandsfahrzeuge jetzt mit diesen Technologien nachgerüstet und in den nächsten 10-15 Jahren durch Elektro-Fahrzeuge bzw. Fahrzeuge mit CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffen ersetzt werden; und die damit verbundene Infrastruktur für einen anderen Zweck umgestaltet oder abgeschrieben wird<sup>17</sup>.

**Der optimale Weg zu CO<sub>2</sub>-Neutralität wird voraussichtlich eine nahezu gleichbleibende oder sogar leicht steigende Gasförderung bis 2040 erfordern, gegeben der:**

- Entwicklung konsequenter Politikmaßnahmen zur Sicherstellung von ausreichend niedrigen Levels von Methan-Leakage im gesamten Produktions- und Nutzungsprozess (0,2 % für 'Upstream Leakage', insgesamt 1% für 'Upstream, Midstream und Downstream' Emissionen), bevor die Nutzung von Gas ausgeweitet wird.
- Im Voraus angekündigte Strategien, um sicherzustellen, dass die gasnutzenden Sektoren letztendlich
  - auf Biogas umstellen – wobei die begrenzte Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse berücksichtigt wird, was wiederum in Preisdruck resultieren wird;
  - Kohlenstoffbindung und -Sequestrierung auf bestehende, gasbetriebene Produktionsverfahren anwenden;
  - von Erdgas auf Strom, Wasserstoff oder Bioenergie umstellen, womit einhergeht, im Voraus die Abschreibung der Gasinfrastruktur und -anlagen vor deren Nutzungsdauerende und deren Umrüstung zur Nutzung von Wasserstoff einzuplanen.

## DIE ANGEMESSENE ROLLE VON OFFSETS

Aufgrund von stark variierenden Grenzkosten für die Dekarbonisierung der Sektoren, in denen eine Emissionsminderung besonders schwierig ist, und über die gesamte Wirtschaft hinweg, könnte zu Beginn des Übergangsprozesses zu CO<sub>2</sub>-Neutralität in den einzelnen Sektoren der Kauf von Offsets von anderen Wirtschaftssektoren oder dem Landnutzungssektor zulässig sein<sup>18</sup>.

---

<sup>17</sup> Zudem könnte natürliches Gas eine transitionäre Lösung für Wohnraumheizung darstellen, bei zunehmender Elektrifizierung, und anschließend durch Biogas oder Wasserstoff ersetzt werden. Die ETC hat diesen Fall jedoch nicht im Detail organisiert.

<sup>18</sup> Rechtsstreitigkeiten bezüglich der Frage, wie die Reduzierung der Kohlenstoffemissionen aus Offsets zu berücksichtigen sind, die international und außerhalb der regulierten Emissionshandelssysteme gehandelt werden, werden in diesem Bericht nicht behandelt.

Die durch diese Programme (die mitunter als „marktbasierte Maßnahmen“ bezeichnet werden) geschaffenen Anreize werden die Suche nach langfristigeren Lösungen zur Dekarbonisierung induzieren, da Sektoren mit Grenzpreis für Kohlenstoff konfrontiert werden.

Zudem könnte der Kauf von Offsets vom Landnutzungssektor eine wertvolle Finanzierungsquelle bieten, um Investitionen in nachhaltige Landnutzung zu fördern, beispielsweise hinsichtlich der Vermeidung von Entwaldung und Ermöglichung von Aufforstung.

Doch jede Integration von Ausgleichszahlungen müssen streng kontrolliert werden und einer klaren, zeitlichen Begrenzung unterliegen:

- Offsets, die von anderen energienutzenden Sektoren gekauft werden, müssen innerhalb des Regulierungsrahmens von Emissionshandelssysteme erfolgen, deren Gesamtvolumina strikt begrenzt sind und in einem mit den Pariser Klimazielen zu vereinbaren Tempo zurückgehen. Dies impliziert, dass im Jahr 2050 solche Käufe nicht mehr möglich sein werden.
- Zudem sollten Offsets über den Landnutzungssektor idealerweise nur eine Übergangsrolle einnehmen, gegeben des begrenzten Umfangs der insgesamt möglichen natürlichen CO<sub>2</sub>-Sequestrierung. Landnutzungsausgleichszahlungen müssen sehr strikten Regulierungen unterliegen, um sicherzustellen, dass der Kauf von Offsets auch wirklich in inkrementellen Kohlenstoff-Emissionsminderungen resultiert, und adverse Effekte auf Biodiversität vermieden werden.

Zwar könnten - gemäß unserer Analyse - Energie- und Industriesysteme bis 2060 nahezu CO<sub>2</sub>-Neutralität erreichen, jedoch würden weiterhin geringe Residualemissionen verbleiben (ca. 2 Gigatonnen pro Jahr), deren Eliminierung sehr teuer wäre. Daher könnten negative Emissionen aus der Landnutzung oder BECCS auch langfristig eine geringfügige, aber notwendige Rolle spielen.

Gegeben der Einschränkungen hinsichtlich langfristiger, negativer Emissionen, können sektorale Strategien nur dann als mit dem Pariser Klimaabkommen kompatibel bezeichnet werden, wenn diese auf CO<sub>2</sub>-Neutralität innerhalb des jeweiligen Sektors bis 2050 abzielen.

## C. HANDLUNGSMAßNAHMEN: WAS POLITISCHE ENTSCHEIDUNGSTRÄGER, INVESTOREN, UNTERNEHMEN UND VERBRAUCHER TUN KÖNNEN (UND SOLLTEN)

### VORANBRINGEN DES FORTSCHRITTS DURCH INNOVATION

Die vollständige Dekarbonisierung aller Sektoren, in denen eine Emissionsminderung besonders schwierig ist, könnte durch den Einsatz heute bereits entwickelter Technologien eingesetzt werden. Doch viele von ihnen sind noch nicht marktreif und wurden noch nicht in kommerziellem Ausmaß bereitgestellt. Zudem werden in der Zukunft - teilweise bereits innerhalb der nächsten Jahrzehnte - voraussichtlich neue, bisher unvorhersehbare technische Durchbrüche erfolgen und günstigere Wege zur Dekarbonisierung ermöglichen. Um zunehmende Innovationstätigkeit zu fördern und die Wahrscheinlichkeit technischer Durchbrüche zu steigern, sind private Investitionen und Unterstützung durch den öffentlichen Sektor erforderlich.

### ERMÖGLICHUNG DER ELEKTRIFIZIERUNG VON TRANSPORT UND INDUSTRIE

In den Transportsektoren besteht die entscheidende Herausforderung darin, Kostenreduktionen Leistungssteigerungen von Batterien zu erlangen:

- Die inzwischen massiven privaten Investitionen in derzeit vorherrschende Lithium-Ionen-Technologien machen einen Fall von Batteriepreisen sehr wahrscheinlich; bei dieser Entwicklung könnte die Prognose vom BNEF von 88€ pro Kilowattstunde (für Zellen plus Pack) bis 2025 – und vermutlich bereits früher – erfüllt werden.
- Verbesserungen bei Energiedichte, Ladezeiten und Batterielaufzeit werden dann relevanter sein im Vergleich zu weiteren Kostensenkungen. Bei 2-3-facher Verbesserung der Batteriedichte würden batteriebetriebene Elektrofahrzeuge eine vorherrschende Rolle einnehmen, sogar bei Land- und Seetransport über Langstrecken; eine 5-10-fache Verbesserung wäre notwendig, um die Elektrifizierung für den Langstreckentransport per Schiff und Flugzeug realisierbar zu machen. Dies würde grundlegende Änderungen bei der Batteriechemie erfordern.

In den industriellen Sektoren besteht die wichtigste Herausforderung darin, elektrische Zementöfen und Elektroöfen zu entwickeln. Grundlagenforschung sollte das Potenzial radikalerer Durchbrüche in der Elektrochemie für Stahl- und Chemieindustrie untersuchen.

### SENKUNG DER KOSTEN FÜR PRODUKTION UND NUTZUNG VON WASSERSTOFF

Da Wasserstoff mit fast vollständiger Sicherheit eine sehr wichtige Rolle einnehmen wird, ist die Kostensenkung für Produktion und Nutzung von Wasserstoff essentiell. Folgende Maßnahmen könnten dazu beitragen:

- radikale Reduktion der Kosten von Elektrolyse-Anlagen von derzeit 879,50€ pro Kilowatt auf 220€ pro Kilowatt bis Mitte der 2020er;
- Kostensenkung für das Dampfreformieren von Methan in Verbindung mit Kohlenstoffbindung;

- Bis 2025, Reduktion der derzeitigen Kosten für Brennstoffzellen von 88€/Kilowatt auf weniger als 70€/Kilowatt für mittelschwere Nutzfahrzeuge, und für Wasserstofftanks von 13€/Kilowatt auf weniger als 8€/Kilowatt.

## SENKUNG DER KOSTEN FÜR KOHLENSTOFFBINDUNG UND TECHNOLOGIEN FÜR KOHLENSTOFFVERBRAUCH

Die zentrale Herausforderung bei Bindung und Verbrauch von Kohlenstoff bezieht sich weniger auf die fundamentale Technik, sondern vielmehr auf die Frage, wie eine Bereitstellung in ausreichend großem Maßstab erzielt werden kann, um Skalierungsvorteile und Lernkurveneffekte zu generieren.

## REVOLUTIONIEREN DER CHEMISCHEN INDUSTRIE DURCH BIOCHEMIE UND SYNTHETISCHE CHEMIE

Emissionen aus industriellen Verfahren können durch Elektrifizierung, Verbrennung von Biomasse, Kohlenstoffbindung oder -Sequestrierung eliminiert werden. Dagegen stellt sich die Reduktion der nach der Nutzungsdauer entstehenden, örtlich weit verstreuten Emissionen als technisch schwierige Herausforderung dar: Dies trifft insbesondere auf diejenigen zu, die bei der verbleibenden Benutzung flüssiger Kohlenwasserstoffkraftstoffe (in Luft- und Schifffahrt), und bei Kunststoffen und Düngemitteln (die CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen erzeugen) resultieren.

In diesem Kontext sind vier Innovationsbereiche von entscheidender Bedeutung:

- Biochemie mit der zentralen Herausforderung, Rahmenbedingungen für die Entwicklung flüssiger Kraftstoffe oder Rohmaterialien für Kunststoffproduktion zu gestalten, und zugleich die Nutzung derjenigen Biomasse-Quellen zu minimieren, die mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrieren und die Biodiversität bedrohen. Mögliche Hebel wären:
  - Biochemische Technologien zur Ermöglichung von lignozellulosehaltigen Quellen;
  - Gentechnische Veränderung von Nutzpflanzen, die auf trockenen Böden oder in Salzwasser wachsen können (einschließlich Algen);
  - Effizienzsteigerung bei Bioraffinerieverfahren;
- Synthetische Chemie mit zwei zentralen Innovationsherausforderungen:
  - Kostenreduktion für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft (DAC);
  - Identifikation effektiver Methoden zur Produktion von Aromastoffen, verwendet in Kunststoffen;
- Hybride chemische Methoden – d.h. die Kombination von Bio- und synthetischer Chemie;
- Chemisches Recycling von Kunststoffen zur Bedarfsbegrenzung nach neuen Bio- und synthetischen Rohmaterialien.

## ERMÖGLICHUNG HÖHERER EFFIZIENZ UND OPTIMIERTER KREISLAUFWIRTSCHAFT

Um das Potenzial von Energieeffizienz, Materialeffizienz und Nachfragemanagement zu erreichen, sind Innovationen in folgenden drei Hauptbereichen erforderlich:

- Veränderung des Produktdesigns hinsichtlich folgender Anforderungen:
  - Gesteigerte Energieeffizienz – z.B. durch verbessertes Design der Flugzeugzellen und Schiffe;
  - Verwendung neuer kohlenstoffarmer Kraftstoffe – z.B. radikales Neudesign der Flugzeugzellen zur Ermöglichung der Nutzung von Wasserstoff;
  - Verbesserte Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft – z.B. auf Basis von Konzepten für Gebäude, Fahrzeuge und Verpackungen, die Überspezifizierung von Materialien reduziert und nach üblicher Nutzungsdauer Demontage, Trennung und Recycling der Materialien ermöglicht;
- Verbesserung der Systeme zur Materialverarbeitung, insbesondere:
  - Neue Herstellungs- oder Konstruktionstechniken, die Produktionsabfälle reduzieren;
  - Neue Materialien mit höherer Festigkeit, Haltbarkeit oder Stärke, die den benötigten Materialeinsatz reduzieren;
  - Systeme, die auf Basis digitaler Technologien die (Rück-)Verfolgung von Materialien ermöglichen;
  - Automatisierte Sortiersysteme, die eine verbesserte Trennung von Materialien ermöglichen;
  - Methoden zur Trennung einzelner Bestandteile von Kompositwerkstoffen (beispielsweise Textilien);
  - Verbesserte Metallurgie zur Entfernung von Verunreinigungen von Altmetall und zur Produktion hochqualitativer Metalle aus gemischtem Abfall;
- Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, basierend auf längeren Produktnutzungsdauern (durch Design, Instandhaltung, qualitativ hochwertigeren Materialien, Wiederaufarbeitung und -verwendung) und/oder einer intensiveren Nutzung (durch Sharing-Modelle oder besser ausgelasteter Nutzung).

## ENTWICKLUNG NEUER MATERIALIEN

Es besteht signifikantes Potenzial, die Kohlenstoffintensität von Materialien durch Werkstoff-Substitution zu erhöhen:

- Im Bauwesen wird anstelle von Portland-Zement Holz- oder Pozzolan-basierter Beton anstelle eingesetzt;
- Bei Verpackungen, Textilien und in der Herstellung werden Zellulose-basierte Fasern als Ersatz von Kunststoffen eingesetzt (auch für bio-basierte Kunststoffe, die einen viel höheren Einsatz an Biomasse erfordern würden als eine direkte Fasernutzung).

# SECHS INNOVATIONSBEREICHE

Inkrementelle Innovation nötig  
bahnbrechende Innovationen nötig

ZUR VOLLSTÄNDIGEN CO<sub>2</sub>-NEUTRALITÄT IN SCHWERINDUSTRIE UND -TRANSPORT

## ELEKTRIFIZIERUNG



Günstigere und effizientere Batterien  
Elektroöfen für Zement und Chemikalien  
Elektrochemische Reduzierung von Eisen für die Stahlproduktion

## MATERIALEFFIZIENZ UND KREISLAUFWIRTSCHAFT



Neue Designs für Endprodukte  
Rückverfolgbarkeit, Sammeln und Sortieren von Materialien, Recycling-Technologien  
Neue Geschäftsmodelle: Product-as-a-Service (PaaS), Sharing

## WASSERSTOFF



Günstigere Elektrolyse (220 €/kW werden angestrebt)  
Günstigere Wasserstoffbrennstoffzellen und Wasserstofftanks  
Fernverkehr mit Wasserstoff

## NEUE MATERIALIEN



Kohlenstoffarme Zement- und Betonchemie  
Biomaterialien als Baustoffe  
Zellulose-basierte Fasern als Ersatz für Kunststoffe

## BIOCHEMIE UND SYNTHETISCHE CHEMIE



Erhöhte Effizienz bei der Transformation von Biomasse  
Bioenergie und Bio-Rohmaterialien aus lignozellulosehaltigen Quellen und Algen  
Synthetische Chemie, inkl. CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft

## KOHLENSTOFFBINDUNG UND -VERBRAUCH



Effizientere Kohlenstoffabscheidungsverfahren, insbesondere für Zement  
Nutzung von Kohlenstoff in Beton, Betonzuschlägen und Kohlenstofffasern

Abbildung 12

## VORANTREIBEN DES FORTSCHRITTS DURCH POLITIK

Da es mehrere Pfade zu CO<sub>2</sub>-Neutralität in den schwieriger zu dekarbonisierenden Sektoren gibt, sollte die Politik eine marktbasierende Suche zur optimalen Lösung fördern und gleichzeitig jene Bereiche unterstützen, die für den Dekarbonisierungsprozess auf jeden Fall erforderlich sind. Vier komplementäre Strategien sind zur Förderung des Fortschritts erforderlich.

## EFFIZIENTE UND PRAGMATISCHE ANSÄTZE BEI DER GESTALTUNG VON KOHLENSTOFFPREISEN

Angemessene Kohlenstoffpreise müssen eine zentrale Rolle spielen und gleichzeitig Anreize für eine höhere Energieeffizienz, eine angebotsseitige Dekarbonisierung und eine Reduktion der Nachfrage setzen.

Die Einführung von existierende Kohlenstoffpreisgestaltungen, wie das EU-ETS, beginnen eine Rolle bei der Emissionsminderung zu spielen, jedoch sind drei Herausforderungen festzustellen, die deren derzeitige Wirksamkeit noch einschränken:

- Die Gefahr, dass ohne Erreichen einer internationalen Vereinbarung die Einführung von Kohlenstoff-Steuern in einem Land Verschiebungen von Produktionsstandorten für international gehandelte Waren und Dienstleistungen (z. B. Stahl und Aluminium)

induzieren könnte. Dies hat häufig Ausnahmen von Emissionshandelssystemen (auch beim EU-ETS) bedingt;

- Sehr unterschiedliche Grenzkosten für Emissionsminderungen in den jeweiligen Sektoren, sodass die wirtschaftsweiten Preise oft viel zu niedrig sein könnten, um Veränderungen in Hochkosten-Sektoren (wie z.B. Luftfahrt) herbeizuführen.
- Die Unsicherheit hinsichtlich langfristigen Preisentwicklungen bei Emissionshandelssystemen; ausreichend starke Preissignale werden nicht gesetzt, die Technologieentwicklung vorantreiben und Investitionen anregen würden;

Es ist entscheidend, diese Herausforderungen anzugehen und zu bewältigen. Nach wie vor bleiben sektorübergreifende, internationale Vereinbarungen, das Ideal und es ist zwingend notwendig, deren Entwicklung zu verfolgen. Politische Entscheidungsträger sollten jedoch erkennen, dass - auch ohne Umsetzung des Ideals - durchaus die Möglichkeit besteht, Fortschritte zu erzielen: Existierende Emissionshandelssysteme könnten gestärkt und komplementäre, unvollkommene, aber dennoch nützliche Ansätze entwickelt werden, etwa mit folgenden Charakteristiken [Abbildung 13]:

- **Defined in advance** (im Voraus festgelegt), mit teilweise fallspezifischen Steuern, die eine höhere Gewissheit schaffen und dadurch effektivere Anreize setzen, als erreichbar durch fluktuierende Preise, die nach einem Handelssystem festgelegt werden;
- **Differentiated by sector** (nach Sektor differenziert), um verschiedene Grenzkosten zur Emissionsminderung und Technologiebereitschaft widerzuspiegeln, beispielsweise mit weit höheren Kohlenstoffpreisen für Schiff- und Luftfahrt als für die Materialproduzierende industrielle Sektoren;
- **Domestic/regional** (inländisch, regional), etwa mit einem erheblichen Kohlenstoffpreis für Zement (wo der Wettbewerb hauptsächlich auf das Inland begrenzt ist), auch ohne eine gleichermaßen gestaltete Anwendung für Stahl; hier könnte eine freie Allokation innerhalb von Emissionshandels- oder Kompensationssystemen benutzt werden, um die Gefahr von Carbon-Leakage zu verhindern (Allokationen/Kompensationen können mit ambitionierten Benchmark-Technologiestandards verknüpft werden, um Anreize für Innovationen und Investitionen zu schaffen)
- **Downstream** (nachgeschaltet), zum Beispiel angewandt auf Lebenszyklus-Emissionen von Verbraucherprodukten statt auf Produktionsprozesse, ähnlich wie bei Verbrauchssteuern auf Benzin und Diesel, die effektiv einer Kohlenstoffsteuer unterliegen, unabhängig vom Standort, an dem das Erdöl gefördert bzw. raffiniert wurde;

Die Gestaltung solcher Ansätze für das Setzen von Kohlenstoffpreisen sollte die Risiken von Carbon-Leakage über Sektoren und Regionen hinweg reduzieren, und könnte möglicherweise die Entwicklung neuer Systeme zur Verfolgung von Lebenszyklus-Emissionen erfordern. Idealerweise sollten diese sich schrittweise zu einem globalen, konsistenten Kohlenstoffsystem entwickeln.

# PREISGESTALTUNG FÜR KOHLENSTOFF

ANGEMESSENE KOHLENSTOFFPREISE MÜSSEN EINE ZENTRALE ROLLE SPIELEN BEI DER DEKARBONISIERUNG VON SCHWERINDUSTRIE UND -TRANSPORT

Interne Vereinbarungen, die alle Sektoren abdecken, sind ideal und sollten angestrebt werden.



Regierungen können jetzt schon Fortschritte erzielen durch effiziente und pragmatische Ansätze bei der Preisgestaltung für Kohlenstoff

## EFFIZIENTE UND PRAGMATISCHE PREISGEST

| DEFINED IN ADVANCE   | DIFFERENTIATED   | DOMESTIC  | DOWNSTREAM  |
|--|--|---|---|
| <i>(IM VORAUSS FESTGELEGT)</i><br>Setzen eines langfristigen Signals, das Investitionen durch Steuern oder Mindestpreise beeinflusst, statt durch schwankende Preise im Rahmen eines Handelssystems: | <i>(DIFFERENZIERT)</i><br>Differenziert nach Sektor, weil in der Schifffahrt höhere Preise als beim Stahl erforderlich sind, um Änderungen auszulösen. | <i>(INLÄNDISCH)</i><br>Auf Produkte, die nicht international gehandelt werden (z. B. Zement), jedoch nicht auf international gehandelte Produkte (z. B. Stahl). | <i>(NACHGESCHALTET)</i><br>Bezogen auf die Lebenszyklus-Emissionen von Endprodukten, statt auf die Produktionsverfahren (z. B. Besteuerung des Kohlenstoffgehaltes von Verpackungen). |

### INDIKATIVE VERSORGUNGSSEITIGE REDUKTIONSKOSTEN (€/TONNE CO<sub>2</sub>)

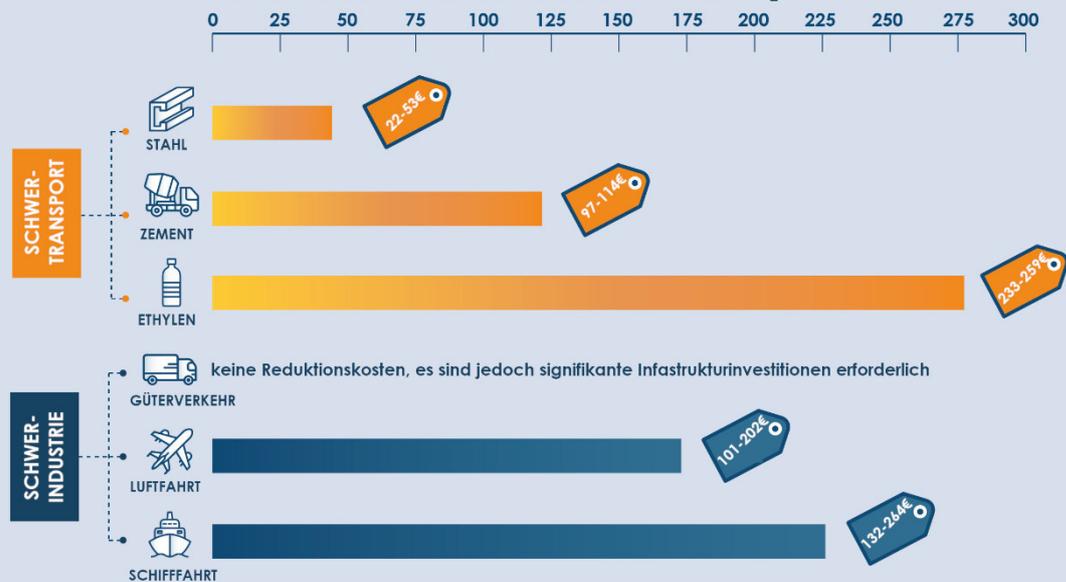


Abbildung 13

## MANDATE UND REGULIERUNGEN

Zusätzlich zur Preisgestaltung für Kohlenstoff, könnten und sollten spezifische Regulierungen in folgenden Bereichen entwickelt werden:

- Regulierung der Energieeffizienz, die wesentlich zu Effizienzsteigerungen in der Automobil- und Haushaltsgeräteindustrie beigetragen haben und die bereits von der

IMO angewendet werden, um Verbesserungen bei der Energieeffizienz neuer Schiffe voranzutreiben;

- Eng definierte Nachhaltigkeitsstandards für Niedrig-Kohlenstoff-Kraftstoffe (inklusive Bioenergie und Wasserstoff), basierend auf einer robusten Lebenszyklusbewertung und Evaluation anderer Umwelteinflüsse;
- Mandate für 'grüne Kraftstoffe', die Fluggesellschaften und Schiffsbetreibern vorschreiben könnten, einen zunehmenden Anteil an CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffen zu verwenden (in Verbindung mit eng definierten Nachhaltigkeitsstandards);
- Regulierungen, die den Verkauf von Diesel- oder Benzin-betriebenen ICE-LKWs ab einem bestimmten zukünftigen Zeitpunkt verbieten und/oder deren Verbot in größeren Städten;
- Bezeichnung ('Labelling') von – und Regulierung zu – Kohlenstoffmengen in Produkten, die die Rückverfolgbarkeit bis zum Ursprung sicherstellen sowie Angaben zu Kohlenstoffintensität und Recycling-Anteil der Materialien in der Produktion von Verbraucherprodukten (z. B. Autos oder Haushaltsgeräte) offenlegen;
- Standards zur Materialeffizienz, insbesondere bei Infrastruktur, Gebäuden und wichtigen Verbraucherprodukten;
- Regulierungen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft, insbesondere durch Durchsetzung von Recycling-Verantwortlichkeiten nach Produkt-Nutzungsdauer und durch Vorgabe eines Produktdesigns, das Recycling ermöglicht/vereinfacht.

## ÖFFENTLICHE FÖRDERUNG VON INFRASTRUKTURENTWICKLUNGEN

Die meisten, erforderlichen Investitionen zum Aufbau einer CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft wird der private Sektor leisten. Doch insbesondere in folgenden Bereichen wird eine aktive Koordination oder Direktzuschüsse seitens der Politik erforderlich sein:

- Stromübertragung über lange Strecken zur Förderung einer hohen Durchdringung von diskontinuierlichen erneuerbaren Energien;
- Infrastrukturentwicklung zum Aufladen und Betanken von Fahrzeugen entlang des Straßennetzes sowie bei Häfen und potentiell auch bei Flughäfen (falls Wasserstoff und Ammoniak zum Einsatz kommen);
- Eisenbahninfrastruktur, insbesondere Verbindungen durch Hochgeschwindigkeitszügen auf regionaler Ebene, um eine größere Verkehrsverlagerung zu ermöglichen;
- Hafen- und Pipeline-Infrastrukturen zur beschleunigten Entwicklung des nationalen und internationalen Handels mit neuen Kraftstoffen, wie Wasserstoff und Ammoniak;
- Netzwerke für Kohlenstofftransport- und Speicherung, wobei Regierungen eine zentrale Rolle bei der Auferlegung strikter regulatorischer Standards sowie bei der Planung und Verbesserung der Streckenführung von Pipelines einnehmen.

## ÖFFENTLICHE FÖRDERUNG VON FORSCHUNG, ENTWICKLUNG UND BEREITSTELLUNG NEUER TECHNOLOGIEN

Die optimale Rolle der öffentlichen Politik zur Förderung des technischen Fortschritts wird abhängig von der Marktfähigkeit der jeweiligen Technologien unterschiedlich ausfallen:

- Bereitstellung bewährter Technologien in kommerziellem Maßstab: In diesem Bereich muss der größte Anteil der Investitionen aus dem privaten Sektor kommen. Doch Regierungen könnten den Fortschritt vorantreiben, indem sie die Finanzierung erleichtern (beispielsweise über Kreditsicherheiten oder rückzahlbare Vorschüsse), und auf Basis öffentlicher Beschaffung, um Nachfrage nach kohlenstoffarmen Waren und Dienstleistungen zu kreieren.
- Überführung von Technologien in Entwicklung zur Marktfähigkeit: Eine Kombination aus öffentlicher und privater Finanzierung von Innovation wird erforderlich sein, um Technologien schneller auf den Markt zu bringen, und insbesondere für die Finanzierung von Pilotprojekten.
- Förderung radikaler „Game-Changer“: Finanzierung aus öffentlicher Hand sollte bestimmte Forschungsbereiche in direkter Weise unterstützen, insbesondere über zielorientierte Programme, bei denen spezifische quantitative Ziele für die nächsten 10 bis 15 Jahre im Voraus festgelegt werden. Hierbei sollte auch die Bereitschaft bestehen zur Förderung mehrerer Forschungs- und Entwicklungsbemühungen, die diese angestrebten Ziele liefern könnten.

## FÖRDERUNG VON FORTSCHRITT DURCH HANDLUNG DES PRIVATSEKTORS

Maßnahmen vom Privatsektor werden zum Erreichen einer vollständigen Dekarbonisierung in Sektoren, in denen eine Emissionsminderung besonders schwierig ist, entscheidend sein.

### INDUSTRIEVERBÄNDE IN SCHWIERIG-ZU-DEKARBONISIERENDEN SEKTOREN

Viele Industrieverbände in zentralen Industriesektoren und im Schwertransport (insbesondere Schiff- und Luftfahrt) bemühen sich bereits, bis 2050 erhebliche Kohlenstoffreduzierungen zu erreichen. Diese Bemühungen könnten noch weiter verstärkt werden durch:

- Entwicklung von Roadmaps zur Erreichung von Null-CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050, einschließlich einer klaren Festlegung, wie Übergangslösungen wie Offsets oder die Nutzung von Gas im Laufe der Zeit schrittweise abgebaut werden.
- Entwicklung von sektorübergreifenden Initiativen zur Entwicklung von Nachfrage nach kohlenstoffarmen bzw. CO<sub>2</sub>-neutralen Produkten (z. B. Partnerschaften zwischen Fluggesellschaften, Flughäfen und Reiseagenturen zur Entwicklung von CO<sub>2</sub>-neutralen Flügen) und zur Förderung der Materialkreislaufwirtschaft (z. B. Partnerschaften zwischen Stahlproduzenten und Herstellern, um die Sammelquote und die Qualität von Stahlschrott zu erhöhen);
- Lobby-Arbeit, um sich für ambitionierte internationale Vereinbarungen zur Preisgestaltung für Kohlenstoff einzusetzen.

### UNTERNEHMEN IN SEKTOREN, IN DENEN EINE EMISSIONSREDUZIERUNG BESONDERS SCHWIERIG IST

Parallel dazu haben führende Industrieunternehmen bereits damit begonnen, sich auf den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Industrie vorzubereiten. Dabei haben sich einige Unternehmen zu wissenschaftsbasierten Zielen verpflichtet, während einige wenige Unternehmen mutigere Verpflichtungen gemacht haben und sich zur Erreichung von Null-CO<sub>2</sub>-Emissionen verpflichtet haben. Wir hoffen, dass immer mehr Unternehmen die folgenden Maßnahmen umsetzen:

- **Investitionen in Forschungs- und Entwicklungsprojekte**, insbesondere Pilotanlagen, fokussiert auf die oben dargelegten zentralen Innovationsprioritäten;
- Entwicklung von Partnerschaften, die eine größere **Materialeffizienz** und mehr **Kreislaufwirtschaft** erzielen können;
- Entwicklung von **regionalen Partnerschaften in Industriecluster**, um Infrastrukturentwicklung und -symbiose voranzutreiben;
- **Entwicklung von langfristigen Geschäftsstrategie** und der Shareholder-Berichte basierend auf verschärften wissenschaftlichen Ziele, die darauf abzielen, bis 2050 Null-CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erreichen.

## GRÖßERE EINKÄUFER VON MATERIALIEN UND VON MOBILITÄTSDIENSTEN

Größere Einkäufer – insbesondere Beschaffungsabteilungen in Unternehmen sowie der öffentlichen Verwaltung – können den Wandel in Sektoren, in denen eine Reduzierung besonders schwierig ist, beschleunigen, indem sie die Nachfrage nach umweltfreundlichen Materialien und Mobilitätsdiensten schaffen, anfangs zu einem Aufpreis. Initiativen dieser Art könnten sein:

- Erweiterung des EV100-Commitments (Verpflichtung zu 100 % Elektrofahrzeugen) von Unternehmen und Städten auf Elektro-LKWs und -Busse (BEVs oder FCEVs);
- Verpflichtung zu Materialien mit kohlenstoffarmen Lebenszyklus-Emissionen für gewerbliche und industrielle Gebäude zur Erreichung bestehender Ziele bezüglich der Energieeffizienz beim Gebäudebetrieb;
- Verpflichtung zur Buchung umweltfreundlicher Flüge, als Alternative zum Kauf von Offsets zur Kompensierung von geschäftlichen Flugreisen.

## VERBRAUCHER

Mit Ausnahme der Luftfahrt und einiger Untersektoren der Schifffahrt sowie des Schwertransports auf der Straße (also Busse) unterliegen die Sektoren, in denen eine Reduzierung besonders schwierig ist, nicht direkt dem Verbraucherdruck. Der Transport von Material und sonstiger Fracht ist jedoch von wesentlicher Bedeutung bei der Lieferung wichtiger Produkte für den Endverbraucher. Eine angemessene Kennzeichnung des Lebenszyklus und der Kohlenstoffintensität von Produkten (z. B. Autos und Haushaltsgeräte) sowie von Dienstleistungen (z. B. Flüge) können eine Rückverfolgbarkeit ermöglichen und ein effektives Werkzeug zur Sensibilisierung der Verbraucher darstellen. Dies könnte zudem die Schaffung eines umweltfreundlichen Angebots zu einem Mehrpreis ermöglichen, da die Kostenauswirkungen der Dekarbonisierung für den Endverbraucher relativ gering sind.

## ÖFFENTLICHE UND PRIVATE INVESTOREN

Neue Investmentchancen werden sich sowohl bei der kohlenstoffarmen Infrastruktur als auch in Unternehmen ergeben, die kohlenstoffarme Innovationen bei Materialien, Produkten und Geschäftsmodellen nutzen. Investoren könnten durch die folgenden Maßnahmen zur Beschleunigung der Dekarbonisierung beitragen:

- eine bessere Evaluierung von klimabedingten Risiken und Chancen, die sich nicht nur auf den Energiesektor konzentrieren, sondern auch auf die Industrie- und die Transportsektoren;
- Entwicklung konkreter Pläne zur Verschiebung von Investment-Portfolios, also vermehrte Investitionen in kohlenstoffarme Infrastruktur, Technologien und Unternehmen, und Kürzung der Investitionen in potenziell aussichtslose Anlagegüter;
- Entwicklung von umweltfreundlichen Investment-Produkten mit unterschiedlichen Risiko-Renditen-Profilen, mit Unterstützung von Entwicklungsbanken, um Investitionen in die Infrastruktur in Entwicklungsländern zu fördern.

## DEN KLIMA-KAMPF GEWINNEN

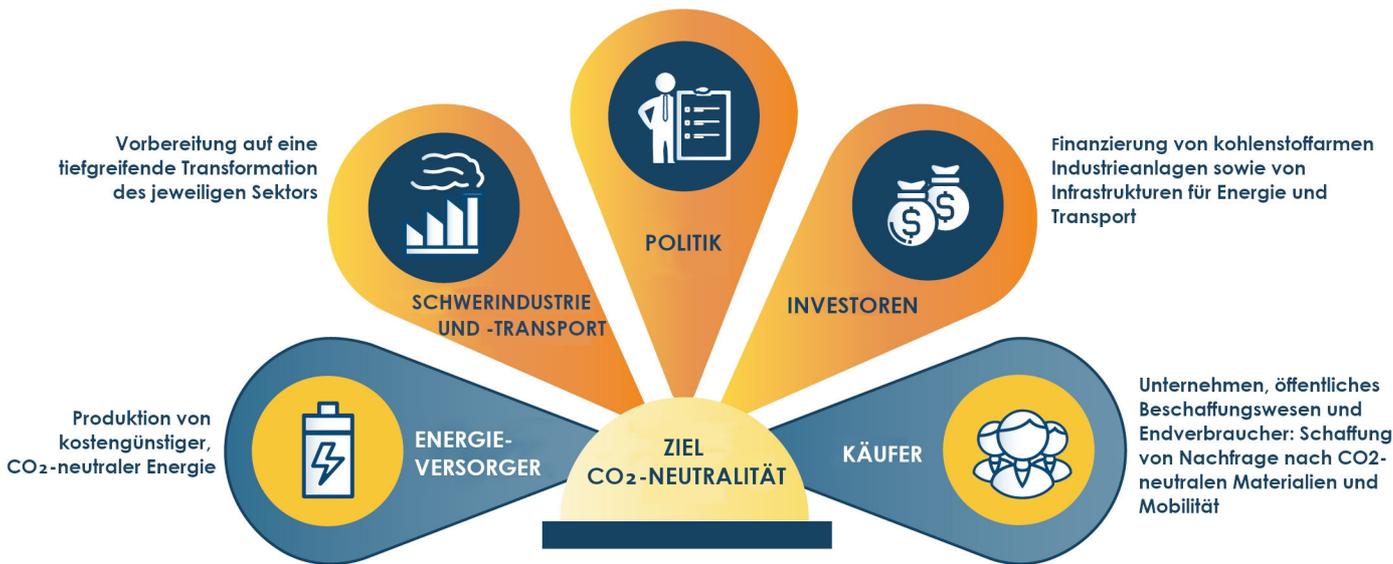
Die Energy Transitions Commission ist der Überzeugung, dass es möglich ist, bis 2050 eine nahezu vollständige Dekarbonisierung in den Sektoren, in denen eine Emissionsreduzierung besonders schwierig ist, zu erreichen, wodurch die Chancen, die globale Erwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen, erheblich steigen. Wenn wir bei diesem historischen Bestreben erfolgreich sind, würde das nicht nur die schädlichen Auswirkungen des Klimawandels begrenzen, sondern es würde auch dazu beitragen, den Wohlstand durch schnelle technische Innovationen und durch die Schaffung von Arbeitsplätzen in neuen Industrien zu fördern, und zudem würde die Umwelt vor Ort in großem Maße davon profitieren. Nationale und kommunale Regierungen, Unternehmen, Investoren und Verbraucher sollten daher die entsprechenden Maßnahmen ergreifen, um dieses Ziel zu erreichen.

# DER KLIMAKAMPF

Mit sofortigen kollektiven Maßnahmen ist das Erreichen der CO<sub>2</sub>-Neutralität in den Sektoren, in denen Emissionsreduktionen besonders schwierig sind – also Schwerindustrie und Schwertransport – technisch and wirtschaftlich machbar.

## UNSERE JEWEILIGEN VERANTWORTLICHKEITEN

Förderung und Unterstützung einer umweltfreundlichen industriellen Revolution



## TREIBER      WER      WAS

- 1 FESTLEGUNG EHRGEIZIGER CO<sub>2</sub>-INTENSITÄTS-ZIELE**

Durchsetzen kohlenstoffintensiver Mandate bei industriellen Verfahren, beim Schwertransport und beim Kohlenstoffgehalt von Verbraucherprodukten.
- 2 FESTLEGUNG EINES PREISES FÜR KOHLENSTOFF**

Anstreben internationaler Abkommen, bis dahin Festlegung von Preisen, differenziert nach Sektor, inländisch, nachgeschaltet und im Voraus festgelegt.
- 3 WANDEL VON EINER LINEAREN ZU EINER ZIRKULÄREN WIRTSCHAFT**

Steigerung der Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette, um Materialeffizienz und Recycling zu verbessern, unterstützt durch eine strenge Regulierung.
- 4 INVESTITIONEN IN UMWELTFREUNDLICHE INDUSTRIEN**

Investieren und Unterstützen von F&E-Projekten sowie der kommerziellen Bereitstellung von Technologien zur Dekarbonisierung in Sektoren, in denen eine Emissionsreduktion besonders schwierig ist.
- 5 NACHFRAGE NACH UMWELTFREUNDLICHEN WAREN & DIENSTLEISTUNGEN**

Freiwillige Verpflichtungen zu einer „umweltfreundlichen Beschaffung“, z. B. LKWs, Flüge, Industrieteile, Baumaterialien.
- 6 REDUZIERUNG DER KOSTEN FÜR ERNEUERBARE ENERGIE**

Reduzierung der Kosten und Steigerung der Produktion von CO<sub>2</sub>-neutralem Strom, CO<sub>2</sub>-neutralem Wasserstoff und wirklich nachhaltiger Bioenergie.





