

STATKRAFT'S LOW EMISSIONS SCENARIO 2020



INHALT

2

Übersicht über das Low Emissions Scenario von Statkraft für das Jahr 2020

5

Einleitung:
Die Energiewende in einer unsicheren Zeit



1. EINE ENERGIEWENDE FUER DIE WELT

9

Neue Erkenntnisse über den Klimawandel angesichts erkennbarer Folgen

12

Klimaschutzverhandlungen: von Kopenhagen über Paris nach Glasgow

12

Klimaschutz bleibt Top-Thema auf der politischen Agenda der EU

14

Investitionen verlagern sich von fossilen auf erneuerbare Energien

17

Ansatzpunkte für eine gerechte Energiewende

2. DAS LOW EMISSIONS SCENARIO VON STATKRAFT: FUER EINE WELT DER ERNEUERBAREN ENERGIEN UND DER ELEKTRIFIZIERUNG

23

Revolution der erneuerbaren Energien

27

Erneuerbare Energien und Batterien verringern Emissionen durch Elektrifizierung

31

Emissionsfreier Wasserstoff und Ammoniak als Alternativen für Elektrifizierung

35

Sektorkopplung durch Elektrifizierung für ein flexibles Energiesystem

37

Das Zwei-Grad-Ziel als Referenz für das Low Emissions Scenario

3. WAS KANN DIE ENERGIEWENDE VERLANGSAMEN ODER BESCHLEUNIGEN?

46

Das Low Emissions Scenario für Europa – eine wirtschaftliche Energiewende

47

Hohe, niedrige und verschleppte Klimaziele bis 2050: Unvorhersehbarkeit hat ihren Preis

48

Schnellere Emissionsminderungen durch höhere CO₂-Bepreisung

49

Vermehrter Einsatz von Wasserstoff in Gebäuden, Industrie und Verkehr

51

Mehr erneuerbarer Energie durch langsameren Kohleausstieg in Europa

52

Hürden beim Ausbau der Onshore-Windkraft: andere Lösungen für die Energiewende

54

Auf dem Weg zu einer sozial gerechten und wirtschaftlichen Energiewende

ANHANG UND FUSSNOTEN

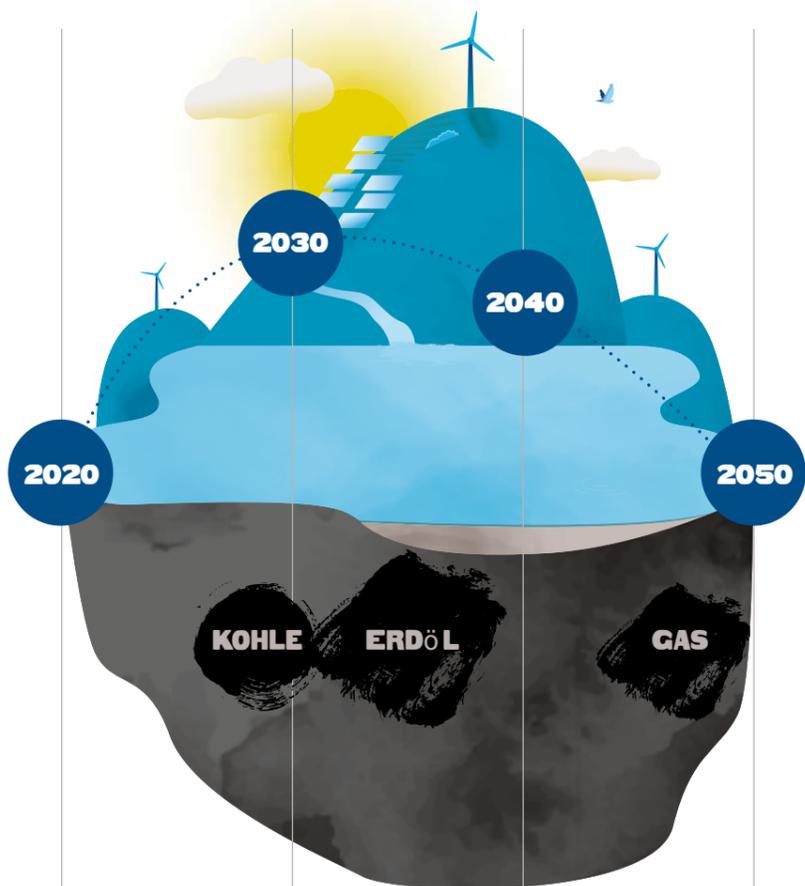
56

ANHANG:
Wichtige Parameter und Annahmen

58

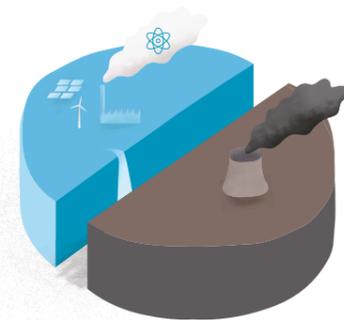
Fußnoten und Quellen





Der Primärenergiebedarf wird im Jahr 2050 genauso hoch sein wie heute. Er wird bis 2030 ansteigen, dann abflachen und schließlich bis 2050 sinken. Dies wird auch bei weiterem Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum der Fall sein.

Die Energiewende wird alle fossilen Energieträger betreffen, allerdings zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Der Bedarf an Kohle wird vor 2025 seinen Höhepunkt erreichen. Die Nachfrage nach Erdöl wird fünf bis sieben Jahre später und die nach Erdgas gegen Ende des Zeitraums auf dem Höchststand sein.

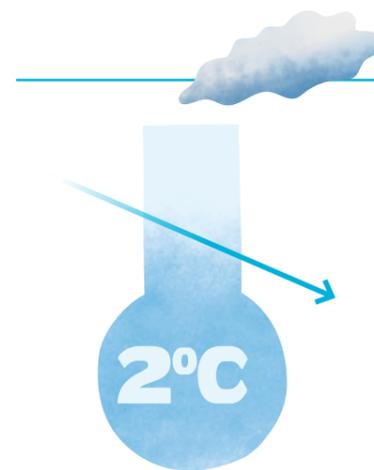


2019 gab es zum ersten Mal seit Jahrzehnten einen höheren Energiebedarf, während die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen zurückging. Außerdem war es das erste Jahr, in dem die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Nuklearenergie die Stromerzeugung aus Kohlekraft übertraf.



2050 werden alle Neuwagen Elektrofahrzeuge und fast 60 % der neuen Nutzfahrzeuge batterie- oder wasserstoffbetrieben sein.

ÜBERSICHT ÜBER DAS LOW EMISSIONS SCENARIO VON STATKRAFT FÜR DAS JAHR 2020



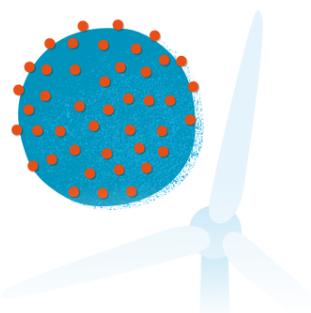
Bei den im Energiesektor anfallenden CO₂-Emissionen wird das Zwei-Grad-Ziel verfolgt.



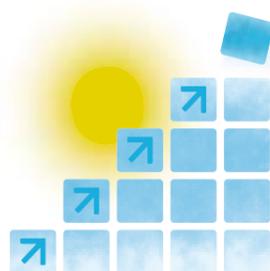
Eine effektive CO₂-Bepreisung in Verbindung mit einer engagierten Klimapolitik wird die Energiewende beschleunigen und die Emissionen schneller senken als eine engagierte Klimapolitik alleine.



Verbindliche Klimaschutzziele und regulatorische Rahmenbedingungen sind für eine erfolgreiche Energiewende unverzichtbar. Zögerliche klimapolitische Entscheidungen werden zu unüberlegten Investitionen und einer kostspieligeren Energiewende führen.



Von der Coronapandemie sind die erneuerbaren Energien am wenigsten betroffen: Erneuerbare Energien werden voraussichtlich die einzige Energiequelle sein, die trotz der Pandemie im Jahr 2020 ein Produktionswachstum verzeichnet, wengleich dieses geringer ausfällt, als vor dem Ausbruch des Coronavirus erwartet wurde.



Im Low Emissions Scenario wird die installierte Leistung im globalen Energiesektor bis 2050 um das Dreifache ansteigen. Der gesamte Zuwachs - und mehr - kann durch erneuerbare Energien abgedeckt werden. Ab 2035 wird Photovoltaik die größte Quelle zur Stromerzeugung sein.



Aufgrund der sinkenden Kosten für erneuerbare Energien wird die Dekarbonisierung durch Elektrifizierung immer attraktiver werden. Die Elektrifizierung wird die Emissionen von Gebäuden, Industrie und Verkehr deutlich senken.



Emissionsfreier Wasserstoff in verschiedenen Formen (wie Ammoniak) wird eine immer größere Rolle in Anwendungsbereichen spielen, in denen die direkte Elektrifizierung eine Herausforderung darstellt.



Das Energiesystem der Zukunft wird eng vernetzt sein und zu komplexen Wechselbeziehungen führen: Elektrizität und emissionsfreier Wasserstoff in verschiedenen Formen werden ausschlaggebend sein, und die Dynamik zwischen den verschiedenen Sektoren wird von zentraler Bedeutung sein.



Der hohe Anteil von erneuerbaren Energien erfordert eine hohe Flexibilität des Energiesystems, um die wetterabhängig schwankende Erzeugung von Wind- und Solarenergie auszugleichen. Mit Batterien und flexiblem Wasserstoff werden zusätzliche Alternativen entwickelt. Noch ist Wasserkraft die einzig erneuerbare Alternative, die sowohl kurz- als auch langfristige Flexibilität zu akzeptablen Kosten bietet.



Das Low Emissions Scenario von Statkraft wird von Statkrafts Team für strategische Analysen in Zusammenarbeit mit Experten aus anderen Bereichen erstellt. Über 50 Fachkräfte arbeiten bei Statkraft an der Marktanalyse. Eine Übersicht über die wichtigsten Parameter und Annahmen des Low Emissions Scenarios finden Sie im Anhang auf Seite 56.

DIE ENERGIEWENDE IN EINER UNSICHEREN ZEIT

Die Coronapandemie hat die Welt lahmgelegt. Die Menschen reisen weniger und geben auch weniger Geld aus. Am härtesten hat es fossile Energiequellen getroffen. Erneuerbare Energien sind die einzigen Quellen, die 2020 ein Wachstum verzeichneten.

2019 war das erste Jahr seit mehreren Jahrzehnten, in dem der weltweite Strombedarf stieg, während die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen zurückging. Außerdem war es das erste Jahr, in dem die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zusammen mit der aus Nuklearenergie die Stromerzeugung aus Kohlekraft übertraf.

2020 hat die Coronapandemie mit den darauf folgenden Infektionsschutzmaßnahmen die Welt lahmgelegt. Das bisherige Ergebnis ist beeindruckend: Erneuerbare Energien sind die einzigen Energiequellen, die ein Wachstum verzeichneten.

Größere Unsicherheit

Die unsichere Lage der Weltwirtschaft hat sich mit der Coronapandemie dramatisch verschärft. Der weltweite Umgang mit der Pandemie und die Frage, wie sich die Volkswirtschaften erholen können, werden auch die globalen Energiemärkte noch lange Zeit beeinflussen. Dabei stellt sich in den Energiemärkte die alles entscheidende Frage, ob die Pandemie die Energiewende beschleunigen oder verlangsamen wird.

In Zeiten großer Unsicherheit ist es daher umso wichtiger, Zukunftsszenarien zu entwerfen, um bessere Erkenntnisse zu gewinnen und Entscheidungsträger zu informieren. Dies ist das fünfte Jahr in Folge, in dem Statkraft das Low Emissions Scenario vorstellt. Auch in diesem Jahr basiert das Szenario auf einer Weiterentwicklung bekannter Technologien und geht von einer optimistischen und realistischen Fortsetzung der aktuellen Trends im Bereich der erneuerbaren und sauberen Technologien bis 2050 aus.* In dem Szenario wird davon ausgegangen, dass die globalen Anstrengungen zur Lösung der Klimakrise auch nach der Coronapandemie fortgesetzt werden. Dabei setzt das Szenario ein politisches Engagement voraus, die Energiewende zu ermöglichen, statt diese zu verhindern, sowie eine entsprechende Bereitstellung von privatem Kapital. Das bedeutet, dass sich Markt, Technologien und Politik gegenseitig unterstützen und grundsätzlich dieselben Ziele verfolgen werden.

Solarenergie größte Stromquelle ab 2035

Im diesjährigen Low Emissions Scenario wird ein niedrigeres Wirtschaftswachstum als Folge der Coronapandemie angenommen. Zusammen mit einem deutlich höheren Maß an Elektrifizierung und Energieeffizienz lässt sich daraus schließen, dass der Energiebedarf im Jahr 2050 genauso hoch sein wird wie heute.** In Ländern mit viel Sonne und Wind ist es bereits heute rentabler, neue Anlagen für erneuerbare Energien zu bauen, als in neue Kraftwerke für fossile Brennstoffe zu investieren.

Zudem werden neue Solar- und Windenergieanlagen bestehende Kohle- oder Gaskraftwerke immer weiter verdrängen. Bereits im Jahr 2035 wird Photovoltaik weltweit die Technologie sein, mit der am meisten Strom erzeugt wird. Das Ergebnis wird ein neu strukturiertes, globales Energieversorgungssystem sein, in dem die unterschiedlichen Sektoren durch Strom und emissionsfreien Wasserstoff eng miteinander verknüpft sein werden.

Auf der ganzen Welt wird die Nachfrage nach Kohle und Erdöl zurückgehen, und auch die Nachfrage nach Erdgas wird abflachen, bevor sie bis 2050 rückläufig sein wird. In diesem Jahr stehen die globalen durch den Energieverbrauch verursachten CO₂-Emissionen im Low Emissions Scenario wie im letzten Jahr im Einklang mit dem Zwei-Grad-Ziel.

Letztes Jahr hat Statkraft genau analysiert, was notwendig ist, damit die durch die Energieerzeugung bedingten Emissionen so ausfallen, dass das 1,5-Grad-Ziel eingehalten wird. In diesem Jahr haben wir die potenziellen Auswirkungen auf die Energiewende und alternative Lösungen untersucht, falls Europa dabei auf Hindernisse stößt. Dabei berücksichtigen wir, dass die Wahl der Klimaschutzziele und der politischen Instrumente die Geschwindigkeit und die Kosten der Energiewende beeinflussen werden. Die Analysen zeigen: Selbst wenn wir von einem deutlich niedrigeren Wirtschaftswachstum ausgehen und verschiedene Hindernisse der Energiewende entgegenstehen, werden wir immer noch ein beträchtliches Wachstum bei den erneuerbaren Energien in Europa und auch weltweit verzeichnen, wobei der Schwerpunkt auf der Elektrifizierung und emissionsfreiem Wasserstoff liegt.

*Das Low Emissions Scenario beruht auf bekannten Technologien und eigenen globalen und regionalen Analysen von Statkraft. Die Analysen basieren auf internen Modellen und fundierten Studien externer Quellen. Das Szenario basiert weder auf einer linearen Projektion aktueller Trends, noch wird darin von einem bestimmten Klimaschutzziel ausgegangen und von diesem eine Rückwärtsanalyse durchgeführt.

**Dies bezieht sich auf die Primärenergie, d. h. die direkt geförderte Energiemenge an der Quelle, die noch keinem Umwandlungs- oder Transformationsverfahren unterzogen wurde. Für eine ausführliche Erläuterung siehe Infobox 6 des Berichts.

1

EINE ENERGIEWENDE FÜR DIE WELT

EINE ENERGIEWENDE FÜR DIE WELT

Zu Beginn eines neuen Jahrzehnts ist es naheliegend, zunächst noch einmal zurückzuschauen, bevor der Weg in die Zukunft eingeschlagen wird. Der Klimawandel vollzieht sich schneller und stärker, als noch vor einigen Jahren allgemein erwartet wurde. Es gibt mehr extreme Wetterereignisse, die durchschnittliche Temperatur der Meere steigt immer schneller und auch der Meeresspiegel steigt unaufhörlich an. Diese sichtbaren Folgen machen es leichter, politische Unterstützung für die Energiewende zu bekommen. Inzwischen hat der Widerstand der Bevölkerung gegen bestimmte Klimamaßnahmen gezeigt, wie wichtig eine gerechte Verteilung von Kosten und Nutzen der Energiewende auf Regionen, Länder und soziale Gruppen ist.

In diesem Teil des Berichts werfen wir einen kurzen Blick zurück auf die Klima- und Energieentwicklungen der letzten Jahre. Die Rolle der internationalen Klimaverhandlungen wird genauso beleuchtet wie die führende Position Europas im Klimaschutz, die sich während der Coronapandemie herausgestellt hat. Im anschließenden Kapitel werden einige dieser Klima- und Energietrends im Low Emissions Scenario von Statkraft bis zum Jahr 2050 fortgeführt. Der letzte Teil des Berichts bietet einen umfassenden Ausblick auf die Entwicklung in Europa bis 2050. Dabei werden die Faktoren betrachtet, die das im Low Emissions Scenario angenommene Tempo und die Richtung abschwächen oder verstärken könnten.

Bevor die Welt 2020 von der Coronapandemie überrollt wurde, gehörte der Klimawandel zu den größten globalen Risikofaktoren, sowohl hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit als auch der Folgen¹. Die Klima- und die Coronakrise haben einiges gemeinsam: Beide verlangen nach einer schnellen Lösung, es sind globale Krisen, die aber hauptsächlich regional bewältigt werden müssen, sie sind vielschichtig mit unvorhersehbaren Folgen und lassen sich zeitlich und räumlich schwer abgrenzen².

Als Folge der Coronapandemie erwartet der Internationale Währungsfonds (IWF) inzwischen von 2019 bis 2020 einen Einbruch der Weltwirtschaft um 4,9 %. Es handelt sich um die größte Wirtschaftskrise seit dem Zweiten Weltkrieg. Aufgrund der Pandemie werden voraussichtlich viele Millionen Menschen in die Armut zurückfallen³. Die Ausbreitung und der Umgang mit der Pandemie, sowohl in gesundheitlicher als auch in wirtschaftlicher Hinsicht, wird die Weltgemeinschaft und die Energiemärkte noch lange Zeit prägen. 2020 könnte demnach zu einem weltweiten Wendepunkt werden. Angesichts der zunehmenden politischen Spannungen und des schwächeren Wirtschaftswachstums verändert sich das globale Kräfteverhältnis. Das Epizentrum der Weltwirtschaft verlagert sich immer mehr in Richtung Asien. Wenn ein Land als große Wirtschaftsmacht auftreten kann, gewinnt es auch an politischem Einfluss.

Dies ist auch der Grund für die zunehmende Rivalität zwischen den USA und China. Letztendlich werden sich die Pandemie und die politischen Spannungen auch auf die globale Energieversorgung auswirken.

Neue Erkenntnisse über den Klimawandel angesichts der offensichtlichen Folgen

Die von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen steigen weiter an. Die Folgen des Klimawandels werden immer offensichtlicher. Die Coronapandemie und das dadurch bedingte niedrigere Wirtschaftswachstum sowie der gesunkene Energiebedarf führten in 2020 zu einem vorübergehenden Rückgang des durch den Energieverbrauch bedingten CO₂-Ausstoßes.

Da die Folgen des Klimawandels im letzten Jahrzehnt sichtbarer wurden, ließen sich immer wieder neue Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen den von Menschen verursachten Emissionen und dem Klimawandel gewinnen. 2019 veröffentlichte der UN-Weltklimarat (IPCC) zwei Sonderberichte, die neue Erkenntnisse in Bezug auf Land, Ozeane und die Kryosphäre⁴ präsentierten. Die neuen Daten zeigen Folgendes:

- Veränderungen in der Forst- und Landwirtschaft sowie der Bodennutzung haben seit 2007 zu rund 23 % der vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen beigetragen.
- Zudem schreitet die Erwärmung der Ozeane inzwischen doppelt so schnell voran wie noch vor 25 Jahren.
- Die letzten fünf Jahre waren die wärmsten, und jedes Jahrzehnt seit 1980 war wärmer als alle vorherigen Jahrzehnte seit 1850.
- Seit 2009 haben die Ozeane rund ein Viertel der jährlichen CO₂-Emissionen absorbiert und so den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre begrenzt. Die Erhöhung des CO₂-Gehalts im Meer führt jedoch zu einem Rückgang des pH-Werts, wodurch das Meer saurer wird. Der Meeresspiegel steigt immer schneller an und erreichte 2019 den höchsten Stand seit 1993. Dies ist sowohl auf das verstärkte Abschmelzen der Gletscher als auch auf die Tatsache zurückzuführen, dass sich das Meer bei steigender Temperatur ausdehnt.⁵
- In der Barentssee hat sich die Eisdecke in den letzten 40 Jahren halbiert, und Grönland, die Antarktis und andere Gletscher haben seit 2006 über 650 Gigatonnen Eis pro Jahr verloren.⁶ Das Volumen des jährlichen Eisverlustes entspricht dem 670.000-fachen des Empire State Buildings in New York.

650

Weltweit haben die Gletscher seit 2006 über 650 Gigatonnen Eis pro Jahr verloren.

7

7 Millionen Menschen sterben jedes Jahr an Luftverschmutzung.

1/4

Die Ozeane haben seit 2009 rund ein Viertel der jährlichen CO₂-Emissionen absorbiert.

WETTEREXTREME, GLETSCHERSCHWUND UND OZEANVERSÄUERUNG

HOEHERER CO₂-GEHALT IM MEER

Die Erhöhung des CO₂-Gehalts im Meer führt zu einem Rückgang des pH-Werts, wodurch das Meer saurer wird. Der Meeresspiegel steigt immer schneller an und erreichte 2019 den höchsten Stand seit 1993.

Dies ist sowohl auf das verstärkte Abschmelzen der Gletscher als auch auf die Tatsache zurückzuführen, dass sich das Meer bei steigender Temperatur ausdehnt.

TROPISCHER ZYKLON IDAI

Der tropische Zyklon Idai traf im Frühling 2019 auf die Ostküste Südafrikas. Zwischen Januar und Juni 2019 wurden über 6,7 Millionen Menschen aufgrund von Extremwetterereignissen evakuiert.



670.000 MAL DAS EMPIRE STATE BUILDING

Grönland, die Antarktis und andere Gletscher haben seit 2006 über 650 Gigatonnen Eis pro Jahr verloren. Das Volumen des jährlichen Eisverlustes entspricht dem 670.000-fachen des Empire State Buildings in New York.





Extremwetterereignisse gibt es immer häufiger – und sie verursachen erhebliche Schäden⁷:

- Zwischen Januar und Juni 2019 wurden über 6,7 Millionen Menschen aufgrund von Extremwetterereignissen evakuiert.
- Australien, Indien, Japan und Europa verzeichneten Rekordtemperaturen. Bei den beiden Hitzewellen, die im Sommer 2019 Europa erreichten, gab es mehr als 4.000 Todesopfer.
- Der Hurrikan Dorian traf im Herbst 2019 auf die Bahamas und Nordamerika. Die dabei verursachten Schäden beliefen sich auf mehr als 3,4 Milliarden US-Dollar.

Die von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen steigen weiter an, während die Folgen immer sichtbarer werden. Die durch den Energieverbrauch bedingten CO₂-Emissionen sind in jedem Jahrzehnt gestiegen: von weniger als 12 Gigatonnen pro Jahr in den 1960er-Jahren auf fast 35 Gigatonnen im Jahr 2018 (Abbildung 1)^{8,9}. 2020 stellt eine Besonderheit dar: Es wird erwartet, dass die Emissionen infolge der Coronapandemie rückläufig sein werden. Aus den Erfahrungen früherer Krisen ist bekannt, dass ein Rückgang der CO₂-Emissionen aufgrund der Pandemie ein vorübergehendes Phänomen sein kann, auf das ein erneuter Anstieg folgt, wenn keine dauerhaften strukturellen Veränderungen in der Gesellschaft stattfinden¹⁰.

Zusätzlich zu den Treibhausgasemissionen stellt auch die lokale Luftverschmutzung ein immer größeres Problem dar. Weltweit sterben jedes Jahr etwa 7 Millionen Menschen an Luftverschmutzung.¹¹ Außerdem haben noch immer 840 Millionen Menschen keinen Zugang zu Strom und 2,6 Milliarden Menschen fehlt es an sauberen Kochmöglichkeiten.¹²

Von Kopenhagen über Paris nach Glasgow: ein neues Jahrzehnt der Klimaschutzverhandlungen

Seit dem Jahr 2000 sind inzwischen zwei Jahrzehnte der Klimaschutzverhandlungen vergangen. 2020 ist ein wichtiger Meilenstein: In diesem Jahr beginnt die Umsetzung des Pariser Klimaabkommens, in dem sich 188 Länder zur Erfüllung nationaler Klimaschutzziele verpflichtet haben.

Die Lösung einer globalen Krise gelingt nur durch globale Zusammenarbeit. Die internationalen Klimaverhandlungen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) sind dabei von großer Bedeutung.

Ein handfestes Ergebnis der Klimaverhandlungen ist das Pariser Klimaabkommen, das noch in diesem Jahr in Kraft treten soll. Dadurch wird 2020 zu einem historisch wichtigen Jahr.

Zu Beginn des Jahrzehnts, 2009, blieb der Klimagipfel in Kopenhagen hinter den Erwartungen zurück. Da es kein neues verbindliches internationales Abkommen gab, wurde 2012 beschlossen, das Kyoto-Protokoll bis 2020 zu verlängern. 2015 kam es dann zu einem Wendepunkt, denn das Pariser Klimaabkommen fand breite Zustimmung. Bis heute haben 189 Länder das Abkommen unterzeichnet.¹⁴ Das Abkommen beinhaltet mehrere bedeutende Beschlüsse, wie etwa, dass die Länder sich dafür einsetzen werden, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius und bis auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Das Pariser Klimaabkommen verpflichtet alle Länder zur Einhaltung nationaler Klimaschutzziele, während sich im Kyoto-Protokoll nur 34 Länder zur Begrenzung ihrer Emissionen verpflichtet hatten.

Aufgrund der durch die Coronapandemie bedingten Versammlungseinschränkungen ist der Weltklimagipfel 2020 in Glasgow auf Herbst 2021 verschoben worden. Einige Bereiche des Pariser Klimaabkommens befinden sich noch in der Verhandlungsphase, darunter die Vorgaben, wie Länder zusammenarbeiten können, um die Klimaschutzziele zu erreichen, sowie die Nutzung von Marktmechanismen. 2020 werden alle Länder ihre Ziele anpassen und erweitern. Anschließend wird alle fünf Jahre bewertet, ob die Ziele des Übereinkommens von Paris erreicht werden können. Wie dieser fünfjährige Nachbesserungsmechanismus funktioniert, wird maßgeblich darüber entscheiden, ob das Pariser Klimaabkommen seine Wirkung zeigt und ob es der Weltgemeinschaft gelingt, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad zu begrenzen.

Klimaschutz bleibt Top-Thema auf der politischen Agenda der EU

In der globalen Klimapolitik hat die EU eine Vorreiterrolle übernommen, wobei sie in ihrer Wachstumsstrategie, dem europäischen Grünen Deal, alle Bereiche der Wirtschaft immer stärker einbezieht. Ziel ist, dass von 2050 an keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden.

Die internationalen Klimaverhandlungen und das Pariser Klimaabkommen waren im vergangenen Jahrzehnt wichtige Grundlagen für die europäische Klima- und Energiepolitik. Noch vor dem Kopenhagener Gipfel

840

Millionen Menschen haben keinen Zugang zu Strom

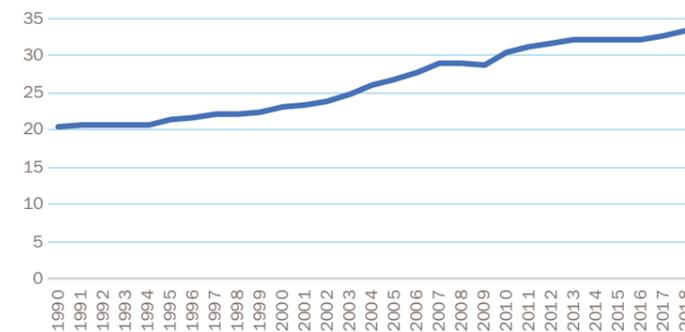
189

Länder haben das Abkommen von Paris unterzeichnet

30 %

des langfristigen Haushalts- und Krisenpakets der EU in Höhe von insgesamt 1.824 Milliarden Euro sind für Klimaschutzmaßnahmen vorgesehen

1 Durch den Energieverbrauch bedingte CO₂-Emissionen weltweit seit 1900 (Gt CO₂/Jahr)¹³



2009 beschloss die EU ein Klimaschutzziel von 20 % bis 2020 (ausgehend vom Stand von 1990). Dieses Ziel wurde bereits 2018 erreicht. Und vor dem Pariser Gipfel 2015 vereinbarte die EU ein Klimaschutzziel von 40 % bis 2030 (ausgehend von 1990). Derzeit ist im Gespräch, dieses Ziel noch weiter zu verschärfen. Die Forderung nach einer langfristigen Strategie für den Klimaschutz im Pariser Klimaabkommen hat dazu geführt, dass sich die EU das Ziel gesetzt hat, Netto-Null-Treibhausgasemissionen von 2050 an zu erreichen.

Damit dies gelingt, müssen die Klimapolitik und entsprechende Maßnahmen alle Sektoren einbeziehen. Genau dies zeigt sich im Entwurf der Europäischen Kommission für eine neue Wachstumsstrategie, dem europäischen Grünen Deal¹⁵.

Im Mittelpunkt der Strategie stehen das Ziel, dass die EU bis 2050 klimaneutral sein soll, ein Entwurf zur Anhebung des Ziels bis 2030 und ein Entwurf für das erste europäische Klimaschutzgesetz der Geschichte. Diese stellen die Weichen für alle anderen Initiativen der Strategie.

Damit der Übergang zu einer emissionsfreien Wirtschaft bis zum Jahr 2050 gelingt, sind tiefgreifende Veränderungen in allen Gesellschaftsbereichen erforderlich. Daher ist der europäische Grüne Deal deutlich umfassender als die bisherigen klimapolitischen Vorschläge der Europäischen Kommission. Er zielt auf eine Stärkung der Marktlösungen in Kombination mit einem strategischen Branchenfokus und einer Verpflichtung zu einer sozial gerechten Energiewende.

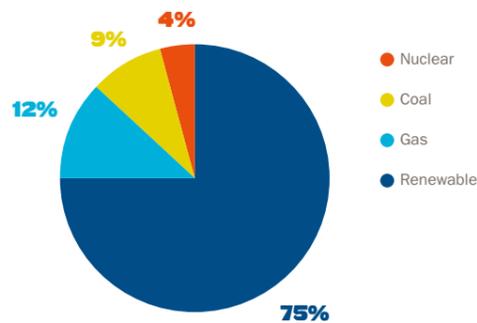
Die EU-Kommission verspricht sich von einem solchen ganzheitlichen Ansatz eine schnellere Energiewende, die sowohl wirtschaftlich als auch sozial nachhaltig ist.

Im Juli 2020 hat die Kommission eine Strategie zur Sektorenkopplung für eine effizientere Energienutzung in allen Wirtschaftszweigen vorgestellt. Die wichtigste Maßnahme ist, einen größtmöglichen Anteil der verbrauchten Energie zu elektrifizieren und fossile Brennstoffe durch erneuerbare Energie zu ersetzen. In den Sektoren Gebäude, Industrie und im Verkehr gibt es ein großes Potenzial für die Elektrifizierung. Ein weiterer Ansatzpunkt ist emissionsfreier Wasserstoff als wichtiger Energieträger für schwer zu elektrifizierende Anwendungsbereiche. Der europäische Grüne Deal umfasst unter anderem eine neue Industriestrategie, einen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, einen Fonds für eine gerechte Energiewende, einen Entwurf zur Stärkung des Emissionshandelssystems und Änderungen bei der Energiebesteuerung.

Das Aushängeschild der Klimapolitik ist nach wie vor das EU-Emissionshandelssystem. Die ehrgeizigeren Klimaschutzziele setzen ein verbessertes Emissionshandelssystem voraus, um so eine wirtschaftliche Energiewende zu gewährleisten. Im Rahmen des europäischen Grünen Deals wird geprüft, ob der Emissionshandelmarkt auf weitere Sektoren, wie z. B. Verkehr und Wärme, ausgeweitet werden soll.

Der teilweise Shutdown der Wirtschaft aufgrund der Coronapandemie führte im zweiten Quartal 2020 zu einem Rückgang des BIP in der Eurozone um 12 %¹⁶. Die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass dadurch die Energiewende verlangsamt wird. Jedoch könnten das vorgesehene EU-Konjunkturprogramm und das langfristige Haushaltsbudget, bei dem 30 % für den Klimaschutz vorgesehen sind, die Umsetzung des europäischen Grünen Deals erleichtern, sodass die künftigen Ziele einfacher erreicht werden¹⁷. Zudem sind in Frankreich und Deutschland Anteile der Konjunkturpakete dafür vorgesehen, die Automobilindustrie in eine grünere Richtung zu lenken. Dies sind Beispiele für Maßnahmen, die die Energiewende beschleunigen können.

2 Globale Investitionen in neue Stromerzeugungsanlagen im Jahr 2019¹⁸

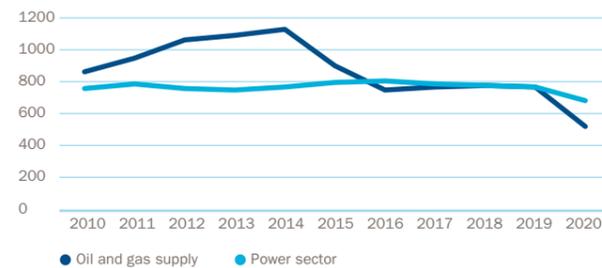


Investitionen verlagern sich von fossilen auf erneuerbare Energien

Der Kapitalmarkt hat sich zu einem wichtigen Impulsgeber für die Energiewende entwickelt. Dank massiver Investitionen in Technologien für erneuerbare Energien hat sich die Leistung der installierten Windkraftanlagen in den letzten zehn Jahren vervierfacht, während der Anteil der Photovoltaikanlagen um das 27-Fache gestiegen ist.

Mit zunehmendem Bewusstsein für Klimarisiken und deren Auswirkungen auf Investitionen hat sich der Kapitalmarkt zu einem wichtigen Impulsgeber für die Energiewende entwickelt. Investitionen in Höhe von 2.600 Milliarden US-Dollar in neue Technologien für erneuerbare Energien haben in den letzten zehn Jahren zu einer Vervierfachung der installierten Leistung von Windkraftanlagen beigetragen, während die Anzahl der Photovoltaikanlagen weltweit um das 27-Fache gestiegen ist.¹⁹ Im Jahr 2019 flossen drei Viertel aller Investitionen im Energiesektor in erneuerbare Energien (Abbildung 2). Seit 2015 sind die weltweiten Investitionen im Stromsektor höher oder mindestens genauso hoch wie die Investitionen in die Öl- und Gasversorgung. Trotz des steigenden Anteils und der Leistung der Anlagen für erneuerbare Energien haben die stark gesunkenen Kosten für Solar- und Windenergie in den letzten Jahren dazu geführt, dass die in erneuerbare Energien investierten Geldsummen in diesem Zeitraum weitgehend stabil geblieben sind. Laut IEA sind die globalen Öl- und Gasinvestitionen in den letzten Jahren rückläufig. Als Folge der Coronakrise werden sie 2020 voraussichtlich deutlich unter den weltweiten Investitionen in den Energiesektor liegen (Abbildung 3)²⁰. Die Pandemie wird voraussichtlich dazu führen, dass die Gesamtinvestitionen im Energiebereich im Jahr 2020 um ein Fünftel niedriger ausfallen als 2019. Davon sind fossile Brennstoffe am stärksten betroffen, wobei der Öl- und Gassektor mit einem geschätzten Verlust von fast 250 Milliarden US-Dollar den größten Rückschlag einstecken muss. Das entspricht einem Drittel des Investitionsvolumens von 2019. Der Energiesektor ist zwar nicht in gleichem Maße betroffen, dennoch wird in diesem Jahr ein Rückgang von rund 10 % erwartet. Dies ist auf den teilweisen Shutdown des gesellschaftlichen Lebens und der Wirtschaft sowie auf Störungen in den Lieferketten weltweit zurückzuführen. 2019 wurden 20 % aller neuen Solaranlagen auf Dächern von Wohn- oder Geschäftsgebäuden errichtet. Diese Entwicklung ließ im Frühling 2020 deutlich nach. Es ist zu erwarten, dass die Windenergie weniger stark betroffen sein wird, vor allem dank einiger Finanzierungsprogramme in den USA und

3 Weltweite Investitionen in die Energieversorgung (Mrd. USD) für 2020 sind vorläufig geschätzt.²²



China, die vorschreiben, dass Windparks bis Ende des Jahres ans Netz angeschlossen werden müssen. Einige Verzögerungen bei Projektumsetzungen und Investitionsentscheidungen sind in diesem Jahr auch bei Photovoltaik- und Windkraftanlagen zu beobachten, sodass bisher weiterhin keine eindeutigen Prognosen getroffen werden können²¹. 2019 war das erste Jahr, in dem die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zusammen mit der aus Nuklearenergie weltweit die Stromerzeugung aus Kohlekraft einholte. Damit war 2019 das erste Jahr seit Jahrzehnten, in dem die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen weltweit zurückging, während die Stromerzeugung insgesamt zunahm.²³

Wegen der Coronapandemie sank der globale Energiebedarf im ersten Quartal 2020 im Vergleich zu 2019 um 2,5 %. 2020 wird der weltweite Stromverbrauch möglicherweise um bis zu 5 % sinken, was der größte Rückgang seit dem Börsen-Crash von 1929 wäre. Bei der Kohleverstromung wurde mit 8 % der stärkste Rückgang verzeichnet. Das liegt auch an den derzeit rekordverdächtig niedrigen Gaspreisen, durch die es in vielen Ländern wirtschaftlicher ist, statt Kohlestrom Gaskraft zu nutzen. Hingegen bewegt sich der Stromanteil aus erneuerbaren Energien in die entgegengesetzte Richtung und stieg im ersten Quartal 2020 um 3 %. Dies liegt zum einen an der Inbetriebnahme neuer Anlagen im Jahr 2019 und zum anderen daran, dass Anlagen für erneuerbare Energien aufgrund ihrer niedrigen Gestehungskosten als letzte die Stromerzeugung einstellen, wenn die Nachfrage sinkt. Strom aus erneuerbaren Quellen ist der einzige Bereich, der 2020 trotz der Pandemie wächst, wenn auch in geringerem Maße als vor dem Ausbruch des Virus vorhergesagt wurde²⁴. In Europa verläuft dieser Trend schneller als in anderen Teilen der Welt. Beim europäischen Energiemix stieg die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien um 11 %, während die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen in der ersten Hälfte des Jahres 2020 um 18 % sank. Dies führte zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen aus dem Stromsektor um 23 %, hauptsächlich aufgrund der Coronakrise, stabiler CO₂-Preise und einem geringeren Energiebedarf²⁵. Somit ist der Wechsel von fossiler auf erneuerbare Energie im Energiesektor in vollem Gange. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Aktienwerte von Unternehmen aus dem Bereich der erneuerbaren Energien während der Coronapandemie relativ stabil geblieben sind. Hingegen sind die Werte im Öl- und Gassektor im Vergleich zum S&P 500 Index deutlich gefallen. Auch bei Unternehmen, die bei Kriterien wie Nachhaltigkeit und soziale Verantwortung gut abschneiden, zeichnet sich eine ähnliche Entwicklung ab.²⁶

-8 %

Strom aus Kohlekraft ist während der Coronapandemie um 8 % gesunken

MEHR

Die Menge an Strom aus erneuerbaren Energien nimmt stetig zu

WENIGER

Die Menge an Strom aus fossilen Brennstoffen nimmt allmählich ab

1

DER KAPITALMARKT ALS WICHTIGER IMPULSGEBER FÜR DIE ENERGIEWENDE

Im Januar dieses Jahres erklärte BlackRock – die größte Kapitalanlagegesellschaft der Welt –, dass das Unternehmen Nachhaltigkeit als neuen Maßstab für Investitionen setze.²⁷ Folglich wird sich BlackRock aus Unternehmen mit einer großen Nähe zu Kohle zurückziehen. Und mit dieser Überzeugung, dass Nachhaltigkeit ein wichtiges Anlagekriterium ist, steht BlackRock nicht alleine da. Etwa 25 % aller Investmentfonds in den USA richten sich mittlerweile nach verschiedenen Vorgaben für nachhaltige Kapitalanlagen. Auch im Rest der Welt ist dieser Trend zu beobachten, wobei vor allem die sogenannten ESG-Investitionen einen rasanten Aufschwung erfahren haben*.

Wurde Nachhaltigkeit bislang von Unternehmen meist als zusätzlicher Kostenfaktor betrachtet, so hat sich dies in den letzten Jahren grundlegend geändert, denn nun steigt der Unternehmenswert durch nachhaltiges Wirtschaften. Einen höheren Nutzen bringt dies insbesondere in drei Bereichen: Unternehmen können kompetente und motivierte Mitarbeiter gewinnen und halten, sie werden von der zunehmenden Anzahl bewusst konsumierenden Kunden bevorzugt und sie bringen ein niedrigeres Klimarisiko mit sich als andere vergleichbare Unternehmen.

Durch die erhöhte Aufmerksamkeit für grüne und nachhaltige Kapitalanlagen gibt es auch Fortschritte bei der Entwicklung verschiedener Klassifizierungssysteme, z. B. ISO-Normen.

Im April 2020 hat die EU eine Taxonomie-Verordnung für nachhaltige Kapitalanlagen verabschiedet, die für jede Technologie spezifische Kriterien festlegt und definiert, was eine nachhaltige Investition ist. Die Verordnung beinhaltet auch Auflagen dazu, wie Treibhausgasemissionen und Klimabilanzen zu messen und zu dokumentieren sind.

Das Klassifizierungssystem ist Teil des Aktionsplans der EU zur Finanzierung von nachhaltigem Wachstum, der 2018 angestoßen wurde. Damit eine Investition als nachhaltig klassifiziert wird, muss sie einen maßgeblichen Beitrag zu mindestens einem von sechs Umweltschutzziele leisten, ohne eines der anderen wesentlich zu beeinträchtigen. Bereits ab 2021 müssen die Finanzbranche und börsennotierte Unternehmen in Europa berichten, wie viel Prozent ihrer Fonds, Portfolios und Investitionen nach dem Klassifizierungssystem nachhaltig sind. Die Taxonomie-Verordnung wird künftige Investitionen in Europa auf verschiedene Weise beeinflussen. So wird z. B. erwartet, dass ein erheblicher Teil des EU-Konjunkturpakets nach der Coronapandemie an Akteure verteilt wird, die entsprechend der Klassifizierung nachhaltige Investitionen tätigen. Es ist wahrscheinlich, dass die Klassifizierung künftig zunehmend als Voraussetzung für EU-Darlehen und -Förderprogramme sowie für Programme der Mitgliedstaaten dienen wird. Eine einheitliche Klassifizierung macht es auch für Kunden und Interessenvertreter einfacher, Anforderungen zu formulieren und die nachhaltigsten Investoren auszuwählen. Somit dürfte das neue Klassifizierungssystem der EU ein wichtiger Impulsgeber sein, um in Europa mehr Kapital auf umwelt- und klimafreundliche Technologien zu verlagern und damit den Schritt zur Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 zu beschleunigen. Welche Bedeutung die Taxonomie-Verordnung für die Finanzierung der Energiewende haben wird, bleibt letztendlich abzuwarten.²⁸

* ESG = Environmental, Social and Governance



Ansatzpunkte für eine gerechte Energiewende

Bei der Energiewende müssen auch die Menschen mitgenommen werden. In den letzten Jahren gab es mehrere Beispiele für den Widerstand gegen bestimmte Klimaschutzmaßnahmen wie höhere Benzinpreise, Mautgebühren, Strategien für den öffentlichen Nahverkehr und den Bau neuer Anlagen für erneuerbare Energien. Wenn das Augenmerk auf einer gerechten Energiewende liegt, können die negativen Auswirkungen verringert und die Vorteile der Energiewende bestmöglich genutzt werden, wodurch die Unterstützung der Öffentlichkeit wächst.

Die Klimakrise betrifft zwar die ganze Welt, aber die Energiewende muss weitgehend auf regionaler und lokaler Ebene stattfinden. Lösungen und Prioritäten werden von Land zu Land und von Region zu Region unterschiedlich sein, wobei sowohl die internationale als auch die regionale Zusammenarbeit den Wandel erleichtern wird.

Nach einem Benchmark-Ranking des Weltwirtschaftsforums zählen Schweden, die Schweiz und Norwegen zu den Ländern, die weltweit am besten auf die Energiewende vorbereitet sind. Der Energiewende-Index erfasst die aktuellen Energiesysteme der Länder sowie die Rahmenbedingungen und Leistungsparameter für einen effizienten Übergang zu einem nachhaltigen und wirtschaftlichen Energiesystem.

Im Allgemeinen sind Volkswirtschaften, die einem stärkeren Wettbewerb unterliegen, nicht so sehr von fossilen Brennstoffen abhängig sind. Verfügen sie über ein stabiles Regulierungssystem und ein starkes politisches Engagement, sind sie besser in der Lage, die Umstellung auf eine „emissionsarme Gesellschaft“ zu bewältigen. Viele Entwicklungsländer können direkt auf erneuerbare und saubere Technologien umsteigen und so die Bindung an Technologien zur Verarbeitung fossiler Brennstoffe vermeiden.²⁹

Eine gerechte Verteilung der Zuständigkeiten unter den Ländern war bei den internationalen Klimaverhandlungen sehr wichtig, wobei die schwachen und die am wenigsten entwickelten Länder besonders berücksichtigt wurden. Auf nationaler und regionaler Ebene ist es äußerst wichtig, dass sowohl die Kosten als auch der Nutzen der Energiewende so gerecht wie möglich aufgeteilt werden. Dies gilt unabhängig von Regionen, Sektoren, Marktteilnehmern und sozioökonomischen Gruppen.

Augenfällige Beispiele für Interessenkonflikte im Zusammenhang mit konkreten Klimaschutzmaßnahmen

gab es in den letzten Jahren unter anderem bei den „Gelbwesten“-Protesten in Frankreich, beim Bau von Onshore-Windparks und bei Mautgebühren in Norwegen oder bei der Diskussion um den öffentlichen Nahverkehr in Chile. Die Energiewende wird neue Chancen, aber auch Nachteile für die Bevölkerung mit sich bringen. Damit eine hinreichende öffentliche Unterstützung gegeben ist, sollten die einzelnen Klimaschutzmaßnahmen bestimmte Gruppen nicht unverhältnismäßig stark beeinträchtigen und sie sollten als kostengünstig wahrgenommen werden, um die Übergangskosten insgesamt zu minimieren. Die Klimapolitik greift mehr und mehr in den Alltag der Menschen ein. Es wird immer deutlicher, dass eine gerechte Energiewende unerlässlich ist. Die Verteilung der Belastungen und das Gefühl der Ungerechtigkeit müssen ernst genommen und behutsam angegangen werden, wenn die Weltgemeinschaft den Übergang zu einer emissionsarmen Gesellschaft schnell genug schaffen will.

Ob die Energiewende aufgrund der Coronapandemie an Unterstützung verliert oder gewinnt, bleibt abzuwarten. Grundsätzlich sind die Menschen in einer längeren Rezession weniger in der Lage und bereit, neue Kosten oder Belastungen zu übernehmen, die durch die Energiewende entstehen. In erster Linie sind die Regierungen daran interessiert, die Wirtschaft kurzfristig zu stabilisieren. Viele europäische Länder haben ohnehin schon eine hohe Staatsverschuldung und schlechte Staatshaushalte, und die Pandemie hat diese Probleme noch verschärft. Der Einsatz von „grünen“ Konjunkturpaketen kann jedoch den Übergang beschleunigen. Wie bereits erwähnt, haben die EU, Frankreich und Deutschland Konjunkturpakete verabschiedet, deren Nutzung an umweltfreundliche Zwecke bzw. Klimaschutzmaßnahmen gebunden ist. Deutschland investiert 8 Milliarden Euro in die Förderung von Elektrofahrzeugen, 9 Milliarden Euro in die Finanzierung einer Wasserstoffstrategie und 2 Milliarden Euro in energieeffiziente Gebäude. Frankreich wird 8 Milliarden Euro aufwenden, um die Verbreitung von Elektroautos zu fördern und den Ausbau von Ladestationen zu beschleunigen.³⁰ Doch, obwohl die EU und einige Länder klar signalisieren, dass nachhaltiges Wirtschaftswachstum Priorität hat, subventionieren Länder auf der ganzen Welt weiterhin fossile Brennstoffe. Laut einer Umfrage von Energy Policy Tracker haben die G20-Länder bisher 47 % der Fördermittel für den Energiesektor, die aufgrund der Coronakrise bereitgestellt wurden, für die Unterstützung fossiler Energieträger verwendet, während 37 % in saubere Energie investiert wurden.³¹



CHILE

Nach einer
Preiserhöhung
des öffentlichen
Nahverkehrs

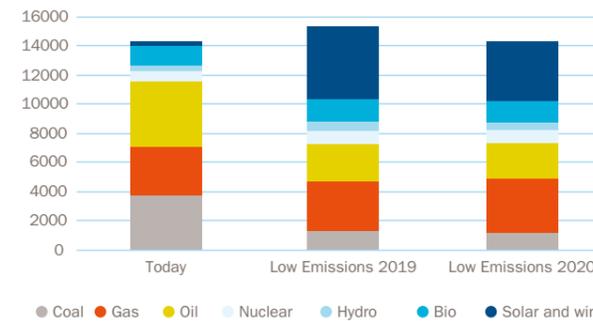
2

DAS LOW EMISSIONS SCENARIO: EINE WELT DER ERNEUERBAREN ENERGIEN UND DER ELEKTRIFIZIERUNG

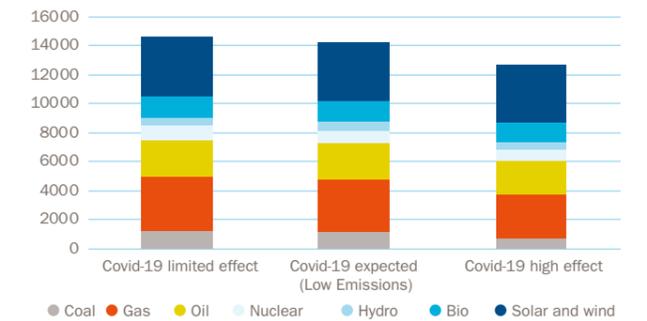
DAS LOW EMISSIONS SCENARIO: EINE WELT DER ERNEUERBAREN ENERGIEN UND DER ELEKTRIFIZIERUNG



Globaler Primärenergiebedarf heute und im Jahr 2050 im Low-Emissions-Szenario (Mtoe)



Globaler Primärenergiebedarf im Jahr 2050 mit verschiedenen Langzeitauswirkungen der Coronapandemie (Mtoe)



Das Low Emissions Scenario von Statkraft ist ein optimistisches, aber realistisches Szenario für eine globale Energiewende von heute bis 2050. Das Szenario geht davon aus, dass sich die Bereiche Politik, Wirtschaft und Technologie grundsätzlich in dieselbe Richtung bewegen. In diesem Kapitel wird untersucht, wie erneuerbare Energien, Elektrifizierung und emissionsfreier Wasserstoff die Treibhausgasemissionen senken, den Energiebedarf abflachen und die Nachfrage nach Kohle, Erdöl und Erdgas bis zum Jahr 2050 verringern.

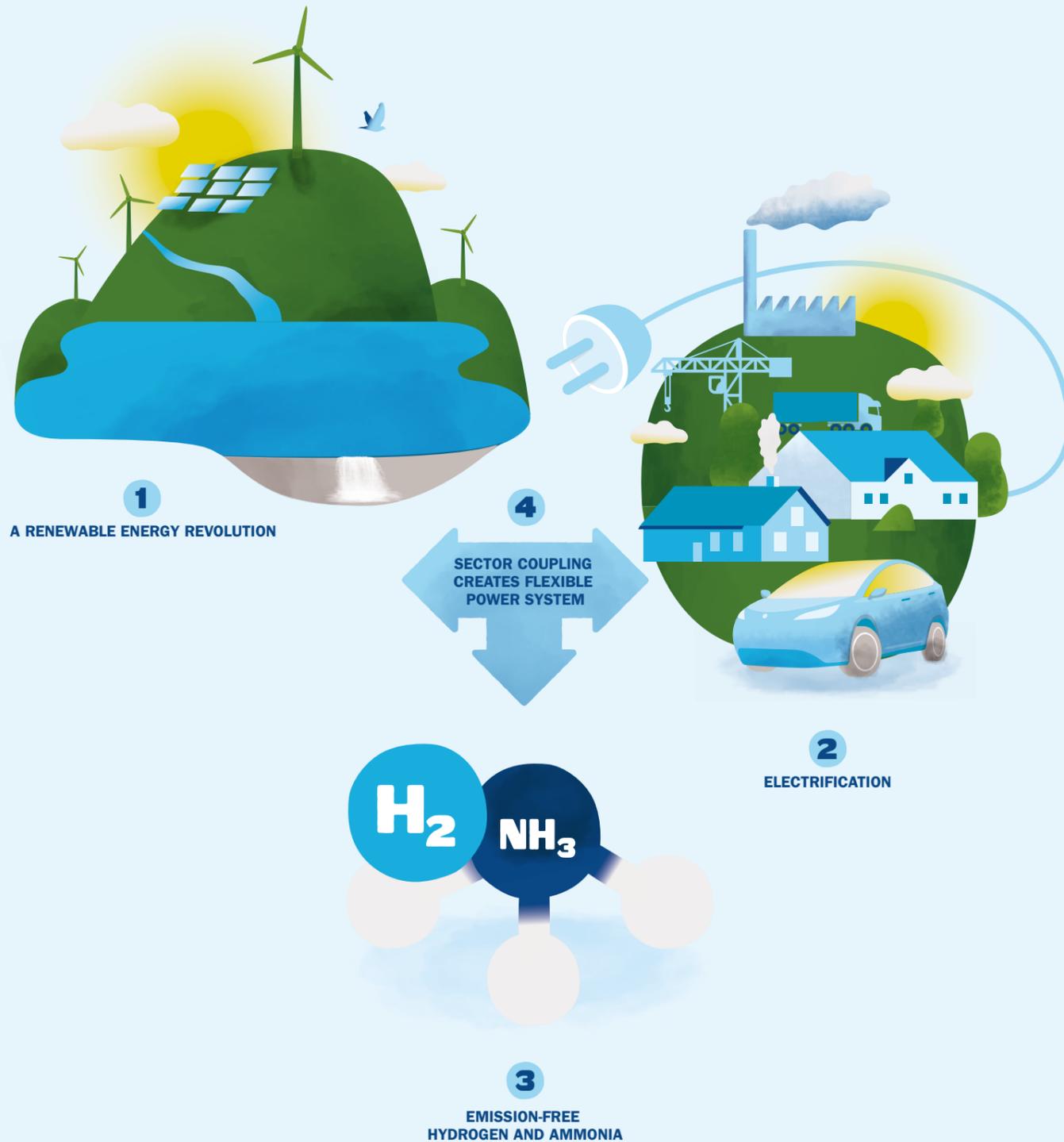
Dank erneuerbarer Energien wird die weltweite Energieversorgung immer grüner. Dennoch wird die Coronapandemie in diesem Jahr in den meisten Ländern der Welt zu einer konjunkturellen Rezession führen, und sie wird das Wirtschaftswachstum und den Lebensstandard weltweit für mehrere Jahre beeinträchtigen. Im Low Emissions Scenario wird angenommen, dass die Pandemie noch mehrere Jahre lang Auswirkungen auf die Weltwirtschaft haben wird, während der Fokus weiterhin auf der Lösung der Klimakrise liegt. Die Konjunktur wird sich zwar erholen, aber die Weltwirtschaft und der Energiebedarf werden bis 2050 niedriger bleiben als vor der Coronapandemie erwartet. Es wird angenommen, dass der Rückgang des Energieverbrauchs 2020 am stärksten im Verkehr, in der Industrie und in gewerblichen Gebäuden zum Tragen kommt, aber die Pandemiefolgen werden bis 2050 allmählich abge-

schwächt. Nach und nach wird sich die Energieeffizienz steigern und die Elektrifizierung durchsetzen, was zu einer weiteren Entkopplung des Primärenergiebedarfs vom Wirtschaftswachstum führt. Der Bedarf an Primärenergie im Low Emissions Scenario wird im Jahr 2050 genauso hoch sein wie heute (Abbildung 4).*

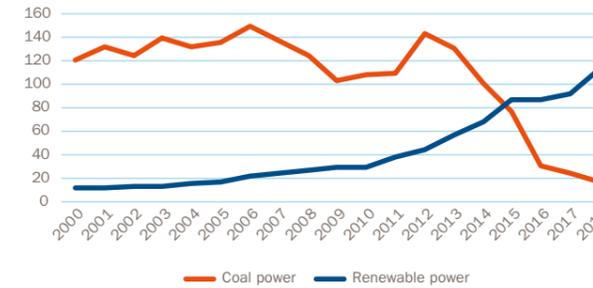
Wie lange die Wirtschaftskrise andauern wird und wie sie sich langfristig auf den Energiebedarf auswirkt, ist zum jetzigen Zeitpunkt ungewiss. Sollte die Wirtschaftskrise verhältnismäßig kurz sein, könnten die Auswirkungen der Pandemie auf den Energiebedarf bis 2050 minimal sein. In diesem Fall muss das Impfprogramm schnell umgesetzt werden und die Welt zu einem „neuen Normalzustand“ zurückkehren, der dem vor dem Ausbruch des Coronavirus stark ähnelt („begrenzte COVID-19-Auswirkungen“). Wie bereits erwähnt, wird im Low Emissions Scenario davon ausgegangen, dass die Auswirkungen auf den Energiebedarf in den nächsten Jahren beträchtlich sein werden, aber im Laufe der Zeit zurückgehen werden („erwartete COVID-19-Auswirkungen“). Ebenso ist es möglich, dass die Wirtschaftskrise gravierender und langwieriger ausfällt, mit strukturellen Veränderungen wie niedrigem Welthandel und weniger globaler Zusammenarbeit, als im Low Emissions Scenario angenommen wird. Dann würde der Primärenergiebedarf über den gesamten Zeitraum deutlich sinken („größte COVID-19-Auswirkungen“) (Abbildung 5).

*Im Low Emissions Scenario wird die Berechnungsmethode der IEA verwendet. Bei der Berechnung des Primärenergiebedarfs werden daher für erneuerbare Energien keine Verluste angenommen. Bei einer alternativen Methode, die ungefähr den gleichen Verlust für die Stromerzeugung von fossiler und erneuerbarer Energie annimmt (38 %), werden fossile Brennstoffe im Jahr 2050 etwa 30 % der Primärenergie abdecken statt fast 50 %. Die absolute Menge an fossilen Brennstoffen bleibt jedoch unabhängig von der Berechnungsmethode unverändert (weitere Details siehe Infobox 6).

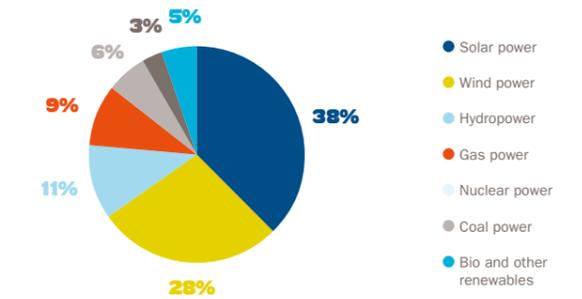
6 Das Low Emissions Scenario basiert hauptsächlich auf vier entscheidenden Trends, die sich gegenseitig verstärken und eine starke Dynamik schaffen.



7 Bisherige Stromproduktion in Großbritannien von 2000 bis 2018 (TWh pro Jahr)



8 Energieversorgungsquellen im Verhältnis zur globalen Stromerzeugung im Jahr 2050 (% in TWh)



Das Low Emissions Szenario basiert hauptsächlich auf vier Trends, die sich gegenseitig verstärken. Sie werden später in diesem Kapitel genauer vorgestellt (Abbildung 6).

- Erstens befinden wir uns inmitten in einer *Revolution der erneuerbaren Energien*: Sinkende Kosten für erneuerbare Energien führen zu einem höheren Anteil an erneuerbaren Energien, wodurch die Kosten weiter sinken.
- Der zweite Trend liegt darin, dass dieser Kostenrückgang zusammen mit den fallenden Batteriepreisen es zusehends lohnender macht, Emissionen durch direkte *Elektrifizierung* in den Bereichen Verkehr, Gebäude und Industrie zu senken.
- Drittens wird durch die niedrigeren Kosten für erneuerbare Energien zusammen mit der Elektrolyse die Dekarbonisierung durch die Nutzung von *grünem Wasserstoff und Ammoniak* für Bereiche attraktiv, in denen sich die direkte Elektrifizierung nur schwer umsetzen lässt.
- Viertens wird die *stärkere Zusammenarbeit* zwischen den *Energiesektoren* über intelligente Lösungen dem Energiesystem mehr Flexibilität verleihen und dadurch einen höheren Anteil an variabler erneuerbarer Energie zulassen.

Zusammen werden diese vier Trends zu *niedrigeren Treibhausgasemissionen*, einer Abflachung des Energiebedarfs und einer sinkenden Nachfrage nach Kohle, Erdöl und Gas führen.

Damit diese Dynamik an Fahrt aufnimmt, ist es die Aufgabe der Politik, in erster Linie die Interaktion zwischen den Märkten und Technologiebereichen zu erleichtern und nicht zu behindern. Die sinkenden Kosten für saubere Technologien werden es den Politikern wiederum ermöglichen, ihre Klimaschutzziele zu erhöhen und eine Energiewende entsprechend dem Low Emissions Szenario oder sogar schneller als dieses zu ermöglichen. In den letzten Jahren hat sich die starke gegenseitige Abhängigkeit zwischen Ländern und Regionen durch die globalen Wertschöpfungsketten deutlich intensiviert. Aktuell lässt sich ein gegenläufiger Trend beobachten. Der Grund: Viele Länder und Unternehmen haben die Erfahrung gemacht, dass sie durch globale und komplexe Wertschöpfungsketten angreifbarer für unvorhergesehene Situationen werden. Die Notwendigkeit einer sicheren Versorgung und Wirtschaftlichkeit kann für sie ein Anreiz sein, die Stromerzeugung trotz der eventuell höheren Kosten näher an den Endver-

braucher zu verlagern. Im Low Emissions Szenario wird eine stärkere Ausrichtung auf regionale Wertschöpfungsketten unterstellt. Die Energiewende wird jedoch weiterhin durch eine starke globale Abhängigkeit und den weltweiten Handel mit Waren und Dienstleistungen erleichtert.

Revolution der erneuerbaren Energien: Solar- und Windkraft verdrängen Kohle- und Gaskraft

Die Kosten für den Bau neuer Anlagen für erneuerbare Energien sinken im Vergleich zu den Kosten für Kohle- und Gaskraftwerke stetig. Schließlich werden die Kosten für neue Solar- und Windkraftanlagen so weit sinken, dass sie sogar günstiger sind als bereits gebaute Kohle- und Gaskraftwerke. Dadurch entsteht weltweit eine starke Wechselwirkung. Und dann werden fossile Brennstoffe von erneuerbaren Energien verdrängt.

Mehrere der größten Energieversorgungssysteme der Welt werden dekarbonisiert – und das kann durchaus schnell gehen. Dabei nimmt Norwegen mit seinem nahezu emissionsfreien Energieversorgungssystem eine Sonderstellung ein. In Großbritannien lag der Kohleanteil bei der Stromversorgung noch vor zehn Jahren bei 30-40 %, heute sind es nur noch 2 % (Abbildung 7). Gleichzeitig gab es einen rasanten Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.³² Großbritannien hat im Juni 2020 mit zwei vollen Monaten ohne Kohleverstromung einen Rekord aufgestellt. Dies ist teilweise auf die Coronakrise und die extrem niedrigen Gaspreise zurückzuführen. Dies ist das erste Mal seit der Industriellen Revolution.³³ Auch in den USA und der EU ließen sich ähnliche Trends beobachten. 2019 fiel in den USA der Anteil der Kohleverstromung um 16 %. Der entsprechende Rückgang in der EU betrug 24 %, gefolgt von einem Einbruch von 32 % in der ersten Hälfte des Jahres 2020.³⁴

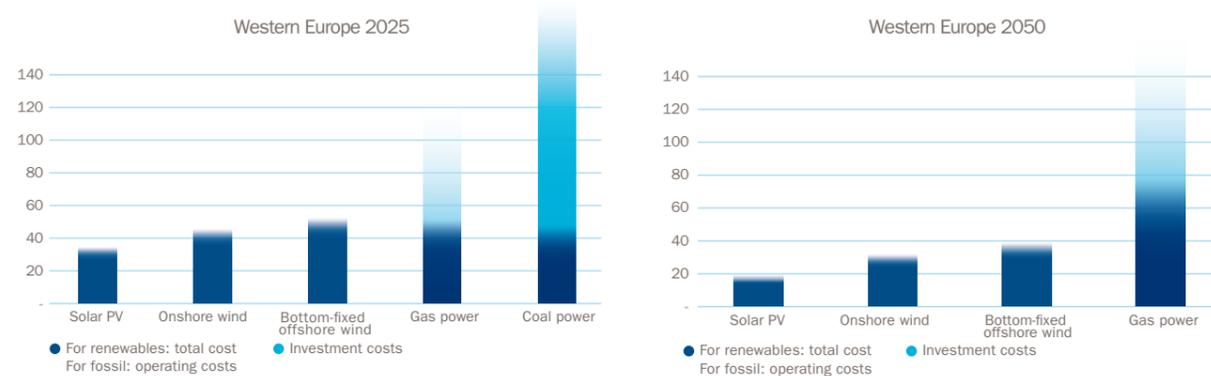
Treibender Faktor der Energiewende sind die rapide sinkenden Kosten für Solar- und Windkraft. In den meisten Teilen der Welt ist es bereits billiger, zur Erweiterung der Stromkapazität Erneuerbare-Energie-Anlagen zu errichten. Zudem werden Solar- und Windenergieanlagen bereits gebaute Kohle- und Gaskraftwerke immer mehr verdrängen (Abbildung 9) Somit wird es billiger sein, in erneuerbare Energie zu investieren, als bestehende Kraftwerke für fossile Brennstoffe zu betreiben. Dies führt weltweit zu starken Impulsen, wodurch fossile Brennstoffe nach und nach durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Die Welt befindet sich mitten in einer Revolution der erneuerbaren Energien.

2,5 %
Im Low Emissions Szenario: Der Strombedarf wächst bis 2050 im Durchschnitt um

Pkws, Stadtbusse, Transporter sowie zwei- und dreirädrige Fahrzeuge werden schnell

-70 %
Die Batteriepreise werden bis 2050 um mehr als 70 % sinken.

9 Durchschnittliche Lebenszykluskosten für verschiedene Stromerzeugungstechnologien im Jahr 2025 (links) und 2050 (rechts) für Westeuropa (EUR/MWh)



Im Low Emissions Scenario wird die installierte Leistung im globalen Stromsektor bis 2050 um das Dreifache ansteigen. Dieser gesamte Anstieg, und noch einiges mehr, wird sich durch erneuerbare Energien decken lassen. Der Anteil der Solarstromerzeugung wird von heute an um durchschnittlich 12 % pro Jahr steigen, während der Anteil der Windstromerzeugung um mehr als 8 % pro Jahr zunehmen wird. Im Gegensatz zur Solar- und Windenergie wurde die Wasserkraft in den letzten hundert Jahren industrialisiert und ist heute mit einer installierten Leistung von 1.290 GW weltweit die größte Quelle für erneuerbare Energien.

Große Wasserkraftwerke arbeiten bereits mit einem sehr hohen Wirkungsgrad (über 90 %). Daher ist hier eine Kostensenkung wie bei Solar- und Windenergie nicht zu erwarten. Für Wasserkraft wird in diesem Zeitraum ein langsames Wachstum von durchschnittlich 1,5 % pro Jahr prognostiziert.*

Wie in der Vorjahresanalyse wird die Solarstromerzeugung wieder die Wind-, Wasser-, Kohle- und Gaskraft übertreffen und ab etwa 2035 die größte Energiequelle sein. Das liegt vor allem an den niedrigen Kosten, aber auch daran, dass Photovoltaikanlagen in Bezug auf den Standort flexibel sind und im Vergleich zu anderen Technologien recht schnell und einfach installiert werden können.

Wasserkraft wird 2040 Kohlekraft und fünf Jahre später Gaskraft überholen. 2050 werden erneuerbare Energien für mehr als 80 % der weltweiten Stromerzeugung genutzt, und 66 % davon werden aus schwankenden Quellen wie Solar- und Windenergie gewonnen kommen (Abbildungen 8 und 12).

Die größten kohlefördernden und -verbrauchenden Länder der Welt, wie China, Indien und Indonesien, befinden sich in einer Sondersituation. In diesen Ländern ist Kohle ein fester Bestandteil der Gesellschaft und die lokalen Kohlepreise sind oft staatlich reguliert und deutlich niedriger als die Weltmarktpreise für Kohle. Deshalb bedarf es in diesen Ländern besonders in den nächsten Jahren eines klaren politischen Engagements, um die Energiewende mit dem im Low Emissions Scenario angenommenen Tempo voranzutreiben. Weitere Details zu den Herausforderungen des Kohleausstiegs sind in Infobox 2 zusammengefasst.

Steigender Bedarf an Flexibilität in den Energieversorgungssystemen der Welt: So verändert ein hoher Anteil an Solarstrom die Preisverläufe über Tage und Jahreszeiten

Der globale Stromsektor von heute verändert sich durch den immer größer werdenden Anteil an schwankender Stromerzeugung. Während die Stromerzeugung aus Kohle, Gas und mancherorts auch mit Wasserkraft bislang flexibel war, wird sie allmählich immer stärker den Ressourcen Sonne und Wind ausgeliefert sein. Doch der hohe Anteil an schwankender Solar- und Windenergie erfordert mehr Flexibilität im Energiesystem.

Die Analysen von Statkraft zeigen im Low Emissions Scenario, dass die Strommärkte den hohen Anteil an erneuerbarer Energie mit schwankender Erzeugungsleistung in den Griff bekommen können.** Hierfür gibt es mehrere Lösungen. Im Bereich der Stromerzeugung werden bestehende und neue Kraftwerke flexibler gestaltet und Stromtechnologien mit komplementären Erzeugungsprofilen entwickelt. Die Erhöhung der flexiblen Kapazitäten von Wasserkraftwerken (sofern verfügbar) wird eine der wirtschaftlich attraktivsten Alternativen sein, um den langfristigen Bedarf an flexiblen Lösungen zu decken. Wasserkraftwerke erreichen dies, indem sie ihre Erzeugungsprofile kurz- und langfristig ändern, um sich an die Nachfrage im Energiesystem anzupassen. Sehr häufig ist es auch wirtschaftlicher, sowohl Solar- als auch Windenergie in Energiesystemen mit einem hohen Anteil an variabler erneuerbarer Energie auszubauen, auch wenn eine dieser Technologien die besten Erträge in einer Gegend aufweist. Das liegt daran, dass sich die Erzeugungsprofile unterscheiden, d. h. der Wind weht oft zu einer Zeit, zu der keine Sonne scheint. Diese Komplementarität kann innerhalb eines Tages, über einen längeren Zeitraum oder sogar über Jahreszeiten hinweg zum Tragen kommen. Abgesehen von einer flexibleren Stromerzeugung ist zu erwarten, dass verschiedene Flexibilitätslösungen für Nachfrage, Netze und Speicherung den Markt erobern werden. Die verschiedenen Lösungen werden im Abschnitt über die Sektorkopplung und in der Infobox 3 über Hybridprojekte später in diesem Kapitel erläutert.

Mit den verschiedenen Flexibilitätslösungen lassen sich Preisschwankungen verringern, indem niedrige Strompreise gefördert und hohe Preise gedrosselt werden. Je nachdem, wie flexibel das Energiesystem gestaltet werden kann, ist bis zum Jahr 2050 immer noch mit einer deutlichen Veränderung der täglichen

*Flexible Wasserkraftwerke eignen sich besonders gut für Bergregionen, wo Stauseen in bestehenden Seen, in der Nähe von Steilhängen und mit festem Gestein errichtet werden können. Doch es gibt nur wenige Standorte, die beide dieser Anforderungen erfüllen.

**Statkraft simuliert die Entwicklung der Strommärkte für die skandinavischen Länder, Europa, Indien und Länder in Südamerika bis zum Jahr 2050 im Detail – stundengenau.

10 Das tägliche Strompreisprofil steigt bei höherem Solarstromanteil im Energiesystem (Abbildung). Der Strompreis ist für die Jahre 2025, 2030, 2040 und 2050 und die Solarstromerzeugung ist pro GW angegeben.



11 Das saisonale Strompreisprofil steigt bei höherem Solarstromanteil im Energiesystem (Abbildung). Der Strompreis ist für die Jahre 2025, 2030, 2040 und 2050 und die Solarstromerzeugung ist pro GW angegeben.



und saisonalen Strompreisprofile im globalen Großhandel zu rechnen. Dies ist in erster Linie auf den großen Anteil von Photovoltaikanlagen in den weltweiten Energiesystemen zurückzuführen (Abbildungen 10 und 11).

Zu diesem Zeitpunkt ist es jedoch nicht möglich, die künftig optimale Zusammensetzung der verschiedenen Flexibilitätslösungen vorauszusagen. Daher ist es entscheidend, dass diese Lösungen zu gleichen Bedingungen auf dem Markt bestehen und so wettbewerbsfähig bleiben können. Der tatsächliche Bedarf an Flexibilität und deren Nutzen wird in Echtzeit ermittelt. Folglich muss dieser Nutzen sowohl für den Verbraucher als auch für den Erzeuger ersichtlich sein. Ein fester Tagesstrompreis wird Verbraucher beispielsweise nicht veranlassen, ihren Stromverbrauch zu verlagern, indem sie nachts ihr Elektroauto aufladen oder ihren Warmwasserspeicher aufheizen, wenn der Gesamtstrombedarf in der Regel niedriger ist³⁵.

Photovoltaik: Fortschritt und zunehmende Verbreitung der Technologie

Weltweit ist mit einem erheblichen Wachstum im Bereich der Photovoltaik zu rechnen. Im Low Emissions Scenario wird geschätzt, dass die installierte Leistung bis 2050 24 Mal größer sein wird als heute (14.100 GW im Jahr 2050). Vor der Pandemie befanden sich sowohl China als auch Europa in einem vielversprechenden Umbruch weg von subventionierten Anlagen – und diese Entwicklung könnte sich in naher Zukunft wieder beschleunigen.

Bis 2050 kommt es mit zunehmender Marktreife zu Kostensenkungen und einer allmählichen Weiterentwicklung der Photovoltaiktechnologie. Dabei werden vor allem nachgeführte und bifaziale Solarmodule (die Strom auf beiden Seiten des Moduls erzeugen) eingesetzt, um die Stromerzeugung von Solarkraftwerken zu maximieren. Bifaziale Solarmodule erzielen durch die Reflexion des Sonnenlichts auf der Rückseite einen höheren Wirkungsgrad. 2019 stammten etwa 4 % der Leistung aus installierten Anlagen von dieser Art von Solarmodulen. Mithilfe der Nachführung werden die Solarmodule entsprechend dem Sonnenstand ausgerichtet, sodass mehr direktes Sonnenlicht auf die Module trifft. Zwar sind die Installations- und Betriebskosten für Nachführsysteme höher, aber dafür steigern sie den Wirkungsgrad der Solaranlage erheblich.

Angesichts sinkender Kosten setzt sich diese Tech-

nologie immer mehr durch und ist in sonnenreichen Regionen bereits Standard.

Bei Solaranlagen hängen die Betriebskosten weitgehend von der Menge der Sonneneinstrahlung ab. Es gibt aber auch große regionale Unterschiede. Pacht, Grundsteuer, Kapitalkosten, lokale Lohnkosten und Ausschreibungsbedingungen sind Faktoren, die die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Projekte bestimmen. Der große Anstieg der Strommenge im Low Emissions Scenario kann auch zusätzliche Kosten für den Ausgleich des Energiesystems bedingen. In einem solchen Fall können Hybridprojekte eine Teillösung sein (Infobox 3). Der Vorteil von Solaranlagen ist ihre Flexibilität: Sie können auf Dächern, auf Seen, an Straßenrändern und auf Agrarflächen installiert werden. Letzteres wird möglicherweise zum entscheidenden Faktor, wenn es darum geht, die Nahrungsmittelherstellung abzusichern, statt mit ihr zu konkurrieren – und wenn es darum geht, mögliche Widerstände zu minimieren.

Schwimmende Solaranlagen auf Seen, Kanälen und Talsperren sind eine relativ neue Technologie. Diese Technologie bietet großes Potenzial in Gebieten mit begrenzter Bodenfläche, schwierigen Bodenbeschaffenheiten oder dort, wo die Verdunstung des Wassers eingedämmt werden muss. Dabei werden die Solarmodule auf Schwimmkörpern montiert, die im Boden des Gewässers verankert sind. Im Gegensatz zu Onshore-Solaranlagen ist diese Technologie auch für schlechtes Wetter, Wellen und Strömungen ausgelegt. Die Anlagen werden aus Materialien hergestellt, die selbst hoher Luftfeuchtigkeit standhalten. In den Reservoirs Wasserkraftwerken können schwimmende Solaranlagen zu geringeren Kosten gebaut werden, da bereits ein Netzanschluss vorhanden ist.

2

DER AUSSTIEG AUS DER KOHLEVERSTROMUNG IST EINE ECHTE HERAUSFORDERUNG FÜR DIE GROSSEN KOHLELÄNDER

Kohle deckt derzeit 27 % des Primärenergiemixes und 38 % des weltweiten Strombedarfs. Dabei wird Kohle hauptsächlich im Strom- und Industriesektor eingesetzt. Im Low Emissions Scenario von Statkraft wird die weltweite Nachfrage nach Kohle bis 2050 um durchschnittlich 3 % pro Jahr sinken, im Stromsektor sogar um mehr als 5 % pro Jahr. 2050 wird der Anteil des Kohlestroms an der weltweiten Stromerzeugung 3 % betragen. Dies ist ein wichtiger Schritt weg von der Kohle. Dennoch werden die großen kohleproduzierenden und -verbrauchenden Länder in Asien noch einen wesentlichen Kohleanteil in ihrem Strommix behalten, insbesondere Indien und China.

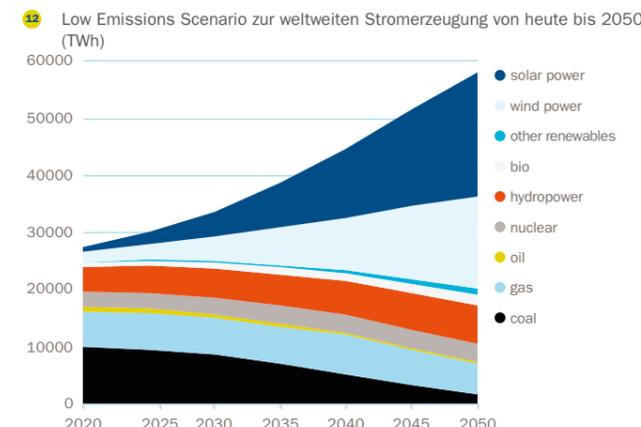
Außerdem könnten wirtschaftliche und politische Faktoren in einigen Regionen den Übergang verzögern und den Kohleausstieg verlangsamen. Dies ist eines der größten Hürden für eine Energiewende im Einklang mit dem Low Emissions Scenario. Die meisten der verbleibenden Kohlenationen haben große nationale Kohlereserven, wobei deren gesamte Wertschöpfungskette für damit verbundene Arbeitsplätze steht. Zudem ist die Kohleindustrie teilweise in Gebieten stark vertreten, in denen andere Sektoren kaum aktiv sind. Das macht den Übergang zu einer enormen Herausforderung. Die Rücksichtnahme auf die Kohleindustrie und die Angst vor sozialen und politischen Unruhen sind in einigen Ländern entscheidende Gründe, warum diese nicht aus der Kohlekraft aussteigen. Außerdem sichert die Nutzung eigener Kohlereserven die nationale energiewirtschaftliche Unabhängigkeit, die in Zeiten starker globaler Spannungen umso wichtiger sein kann. Auch das hohe Maß an Monopolen und regulierten Stromsektoren in vielen dieser Länder können die Wettbewerbsfähigkeit für erneuerbare Energiequellen beeinträchtigen. Dies kann auch mit dem politischen Bestreben einhergehen, eine nationale Kohleindustrie zu erhalten.³⁶

Auf China und Indien als größte Kohleverbraucher und -produzenten der Welt entfielen 2018 50 % bzw. 13 % der globalen Kohlenachfrage. 2019 gingen 17 Länder mit neuen Kohlekraftwerken ans Netz. Dabei beträgt das Durchschnittsalter der Kohlekraftwerke weltweit nur 18 Jahre. Die Betriebsdauer eines Kohlekraftwerks liegt bei etwa 40 Jahren. Das bedeutet, dass in Ländern mit billiger einheimischer Kohle die in den letzten zehn Jahren gebauten Kraftwerke unter Umständen noch die nächsten 30 Jahre weiterlaufen können, wenn sie nicht durch die CO₂-Bepreisung oder durch Regulierungen daran gehindert werden. China hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2060 CO₂-neutral zu sein, und wird dieses Jahr seinen nächsten Fünfjahresplan ab 2021 vorstellen. Hier wird der Kohleausstieg ein wichtiges Thema sein. Es wird über eine Aufstockung der Kapazitätsgrenze für Kohlekraft auf 1.300 GW diskutiert, was in China zu einem weiteren Ausbau in der Größenordnung der gesamten Kohleflotte der USA führen könnte.³⁷ Darüber hinaus sind chinesische Unternehmen auch bei der Errichtung neuer Kohlekraftwerke außerhalb der Landesgrenzen aktiv. Staatliche Großunternehmen sind auf den Export von auf Kohle basierten Waren und Dienstleistungen angewiesen. Der Grund: Staatliche Unternehmen werden für die Planung, den Bau, die Versicherung und die Finanzierung von Kohlekraftwerken im Ausland eingesetzt – normalerweise für ein und dasselbe Projekt. So entstehen intensivere Geschäftsbeziehungen zu den Abnehmerländern.

Im Falle eines schnellen Ausstiegs aus der Kohleindustrie haben somit die Bevölkerung, die Wirtschaft und der Arbeitsmarkt in den wichtigsten Kohleländern viel zu verlieren.³⁸ Damit die Energiewende gelingt, bedarf es klarer nationaler und internationaler Zielsetzungen und der Unterstützung durch die Politik.*

*Die Analyse eines langsameren Kohleausstiegs in Europa folgt im nächsten Kapitel.

Solarmodule auf Agrarfläche



Windkraft: Standardisierung und Turbinengröße als treibende Faktoren bei der Entwicklung

Voraussichtlich wird die globale installierte Leistung der Windkraft im Jahr 2050 sieben Mal höher sein als heute. Damit wird die Windkraft mit einer installierten Leistung von 4.700 GW im Jahr 2050 die zweitgrößte Technologie zur Stromerzeugung.

Der Anteil der Windenergie an der weltweiten Stromerzeugung wird 2050 fast 30 % betragen. Anders als in der Photovoltaikbranche sind die Lieferketten im Windenergiesektor heute eher regional aufgestellt, insbesondere bei Offshore-Windparks. Dieser Trend wird sich voraussichtlich über den gesamten Zeitraum fortsetzen und wurde durch die Coronapandemie sogar noch verstärkt. Die Kostensenkung in diesem Bereich wird in erster Linie durch den starken Wettbewerb und die Standardisierung der wichtigsten Komponenten vorangetrieben. Auch die immer größeren Turbinen tragen maßgeblich zur Kostensenkung bei. Nach 2030 dürften 8-MW-Windturbinen, die in einer Höhe von mehr als 200 Metern angebracht werden, der neue Standard für Onshore-Anlagen sein. Obwohl in diesem Zeitraum keine einschneidenden technologischen Durchbrüche bei der Onshore-Windenergie zu erwarten sind, wird es zahlreiche Verbesserungen bei Konstruktion, Betrieb und Wartung geben. Die Digitalisierung, die Nutzung von künstlicher Intelligenz und Optimierungsalgorithmen werden ebenso an Bedeutung gewinnen wie das Energiemanagement. So wird die Erzeugung mit Blick auf Strompreise, variable Kosten und Betriebsdauer optimiert. In den letzten Jahren gab es in mehreren Ländern zunehmenden Widerstand gegen neue Onshore-Windanlagen. Dies verdeutlicht, wie wichtig überschaubare, transparente Genehmigungsprozesse mit Einbeziehung der Bevölkerung vor Ort sind (weitere Details in Kapitel 3).

Die Betriebskosten für Windkraftanlagen variieren je nach Standort erheblich und werden durch die jeweiligen Windverhältnisse, die Entfernung zum Stromnetz, die Bau- und Kapitalkosten sowie die lokalen Lohnkosten und die ansässigen Lieferanten beeinflusst. Da Windkraft auf dem Strommarkt immer häufiger eine Rolle spielt, wird die Wirtschaftlichkeit von Projekten stärker von den Ausschreibungsbedingungen, den kommerziellen Bedingungen und den zugrunde liegenden Strompreisen abhängig sein. Bei der Optimierung der Stromausbeute werden die Auslegung von Windparks und die Betriebsstrategien immer wichtiger werden.

Der weltweite Ausbau der Offshore-Windparks wird im Vergleich zu dem der Onshore-Windparks als eher mäßig eingeschätzt. Dies liegt vor allem daran, dass bei Onshore-Windkraftanlagen generell mit niedrigeren Kosten zu rechnen ist als bei der Offshore-Windenergie. Dennoch werden im Boden verankerte Offshore-Windparks in Ländern mit guten Windverhältnissen auf See bald mit Onshore-Windparks konkurrieren können. Dies zeigt sich derzeit in Großbritannien. Einschränkungen bei den Bodenflächen können auch Offshore-Windenergie zu einer interessanten Alternative werden lassen, insbesondere wenn die Mehrkosten gegenüber der Onshore-Windenergie klein sind. Grundsätzlich hat Offshore-Windenergie ein größeres Leistungspotenzial als Onshore-Windenergie und ist weniger mit Flächenkonflikten behaftet. Deshalb ist anzunehmen, dass der Anteil der Offshore-Windenergie bis zum Jahr 2050 zunehmen wird. Darüber hinaus kann auch die Wasserstoffherstellung aus den vergleichsweise großen Strommengen, die durch Offshore-Wind erzeugt werden, für manche Länder eine interessante Option sein.

Schwimmende Offshore-Windparks sind immer noch von Pilotprojekten geprägt und nach wie vor deutlich teurer als bodengebundene Offshore-Windparks. In Fällen, in denen der Bau von bodengebundenen Offshore-Windparks möglich ist, ist es daher wahrscheinlich, dass diese Technologie zuerst in Betracht gezogen wird. Folglich werden schwimmende Offshore-Windkraftanlagen vor allem in Gebieten in Frage kommen, in denen die Möglichkeiten für bodengebundene Offshore-Windparks und andere erneuerbare Technologien begrenzt sind. Dies ist besonders in Ländern wie Japan, Südkorea und Teilen der USA von Bedeutung, wo der größte Teil des Meeresgebietes für feste Installationen – etwa aufgrund der Tiefe oder des Meeresbodens – ungeeignet ist. Auf lange Sicht könnte der Mangel an geeigneten Flächen für bodengebundene Offshore-Windparks in Teilen Europas ebenfalls zu einem Einflussfaktor werden. Die Entwicklungen der nächsten Jahrzehnte werden stark von den wirtschafts- und klimapolitischen Zielen der jeweiligen Länder abhängen und davon, ob diese Technologie so weit subventioniert wird, dass die Kosten auf ein wettbewerbsfähiges Niveau sinken können. Aus diesem Grund bleibt es sehr ungewiss, wie viele Kapazitäten so realisiert werden können und welches Kostenniveau dabei erreicht werden kann.

X 24
Die Solarstromkapazität wird 2050 24 Mal größer sein als heute, die Windkraftkapazität sieben Mal größer.

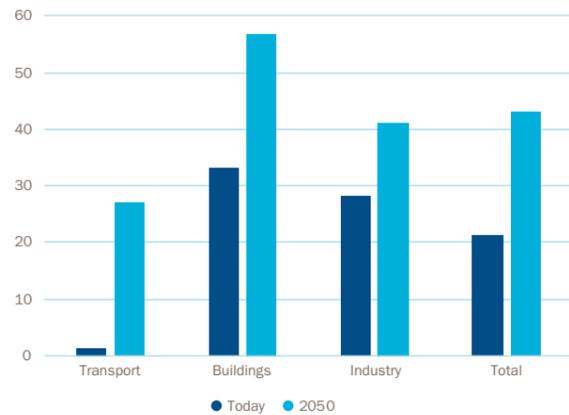
-5 %
Der Bedarf an Kohle im Stromsektor wird von heute bis 2050 jedes Jahr im Durchschnitt um mehr als 5 % sinken.

An aerial photograph of a dense, lush green forest, likely a coniferous forest, viewed from a high angle. The trees are packed closely together, creating a vibrant green canopy. The lighting is bright, suggesting a sunny day, with some highlights on the tops of the trees.

**WIR
BEFINDEN UNS
INMITTEN EINER
REVOLUTION DER
ERNEUERBAREN
ENERGIEN**

**FUER DIE
WELTWEITE
ENERGIE-
VERSORGUNG
DER
ZUKUNFT**

13 Low Emissions Scenario zur Elektrifizierung in Prozent der Endverbrauchsenergie pro Sektor



Erneuerbare Energien und Batterien verringern Emissionen durch Elektrifizierung

Im Low Emissions Scenario werden im Jahr 2050 43 % des weltweiten Energiebedarfs durch Strom gedeckt – im Vergleich dazu, sind es heute nur etwa ein Fünftel. Dieser Abschnitt befasst sich mit der Frage, wie Verkehr, Gebäude und Industrie dekarbonisiert werden können, indem die emissionsfreie Energie aus Wind- und Sonnenkraft zur Elektrifizierung genutzt wird.

Die stetig sinkenden Kosten für Solar- und Windenergie bedeuten, dass die Elektrifizierung in vielen Fällen die kostengünstigste Klimaschutzmaßnahme sein wird. Damit es der Welt gelingt, die Emissionen zu senken, wird die Elektrifizierung in Sektoren wie Verkehr, Gebäudetechnik und Industrie von großer Bedeutung sein.

Im Low Emissions Scenario verdoppelt sich die Nachfrage nach Strom in diesem Zeitraum und wächst um durchschnittlich 2,5 % pro Jahr. Der gesamte Zuwachs beim Strombedarf wird auf erneuerbare Energien entfallen, die zudem Kohle, Gas und Öl aus dem Strommix verdrängen werden. Der Anteil der fossilen Brennstoffe im Strommix wird von derzeit 64 % auf 13 % im Jahr 2050 fallen.

Im Low Emissions Scenario wird davon ausgegangen, dass der Stromverbrauch im Verkehrssektor am stärksten zunehmen und 2050 bei 27 % liegen wird, ausgehend von einem äußerst niedrigen Ausgangswert von 1 %. Heute werden über 90 % des Energieverbrauchs durch Erdöl abgedeckt.

Bei Batterien lässt sich ein rasanter Kostenrückgang beobachten – getrieben durch die steigende Zahl von Elektrofahrzeugen. Im Low Emissions Scenario wird angenommen, dass Pkws, Stadtbusse, Transporter sowie zwei- und dreirädrige Fahrzeuge schnell elektrifiziert werden. Unsere Analysen zeigen, dass in immer mehr Ländern die Lebenszykluskosten für diese Elektrofahrzeuge schneller sinken werden als für Fahrzeuge, die fossile Brennstoffe benötigen. Im Low Emissions Scenario wird eine Reduzierung der Batteriekosten um mehr als 70 % bis 2050 prognostiziert. Zurzeit gibt es Bemühungen, die Produktionskapazität für Batterien zu erweitern und die Lieferkette zu diversifizieren. Der Markt ist noch nicht gesättigt und Verbesserungen der Produktionslinien bieten nach wie vor ein großes Potenzial. Wenn die Kosten um 70 % gesenkt werden sollen, wird die Batterieproduktion auch auf andere chemische Komponenten angewiesen sein als die, die derzeit verwendet werden.

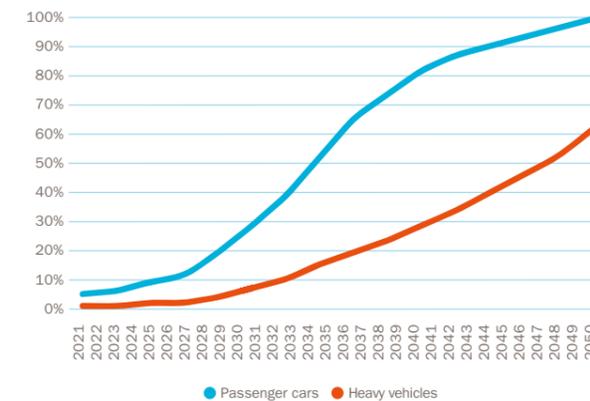
3

HYBRIDPROJEKTE ALS WETTBEWERBSFÄHIGE ALTERNATIVEN: SOLAR-, WIND- UND WASSERKRAFT MIT BATTERIE ODER GRÜNEM WASSERSTOFF

In einem Energieversorgungssystem mit einem wachsenden Anteil an schwankender erneuerbarer Energie wird ersichtlich, dass die Kombination verschiedener Technologien am gleichen Standort eine praktische Lösung sein kann. Eine solche Lösung wird als Hybridprojekt bezeichnet. Durch die Verbindung der variablen Erzeugung erneuerbarer Energie mit Speicherlösungen wie Batterien oder grünem Wasserstoff können solche Projekte unabhängig von Strompreisschwankungen funktionieren und sowohl Energie als auch Flexibilität in das System einbringen. Batterien und/oder Elektrolyseuren gepaart mit Solar-, Wasser- und/oder Windkraftanlagen können Installations- und Netzanschlusskosten sparen. Bei steigendem Anteil von Solar- oder Windenergie in den Systemen werden die Strompreise in Zeiten mit viel Sonne oder Wind, typischerweise zur Tagesmitte, fallen (siehe Abbildung 10). Wenn z. B. Solaranlagen mit Batterien gekoppelt werden, können Zeiten mit niedrigen oder negativen Strompreisen dann zum Laden der Batterien genutzt werden. Anschließend können die Batterien diesen Strom in das Netz einspeisen, sobald der Strombedarf steigt und das sonstige Angebot sinkt. In vielen Ländern der Welt wird dies im Laufe des Nachmittags der Fall sein. Angesichts der fallenden Kosten für erneuerbare Energien, Batterien und grünen Wasserstoff ist davon auszugehen, dass es immer mehr verschiedene Arten von Hybridprojekten geben wird. Letztendlich kann ein Hybridprojekt rentabler sein als die einzelnen Teilprojekte. Ein weiterer Vorteil von Hybridprojekten ist, dass sie kritische Systemdienstleistungen für Verteilnetzbetreiber ermöglichen und besonders in Gebieten mit begrenzter Netzkapazität relevant sein können.



14 Batterieelektrischer und wasserstoffelektrischer Anteil an den weltweiten Neuwagenverkäufen im Low Emissions Scenario (%)



Dadurch werden die Leistungsfähigkeit der Batterien erhöht, die Materialkosten gesenkt und außerdem eine Verknappung von Komponenten und Materialien verhindert.

Stationäre Batterien machen etwa 12 % der gesamten durch Batterien bereitgestellten Leistung im Jahr 2050 aus (in GWh), während der Rest aus dem Verkehrssektor stammt. Nach Schätzungen im Low Emissions Scenario werden fast alle neuen leichteren Fahrzeuge weltweit batteriebetrieben sein, während fast 60 % der neuen schwereren Fahrzeuge im Jahr 2050 mit Batterie oder Wasserstoff fahren werden (Abbildung 14).

Energieeffiziente Gebäude und Geräte, Direktelektrifizierung in Form von Wärmepumpen sowie Wasserstoff und Bioenergie werden die durch den Energieverbrauch in Gebäuden verursachten Emissionen in diesem Zeitraum um 46 % senken. Der Anteil des Stroms am gesamten Endenergieverbrauch wird im Low Emissions Scenario von heute 33 % auf 57 % im Jahr 2050 steigen.

Bei der *Energienutzung in der Industrie* sind die Zement-, Chemie- und Stahlindustrie heute für 12-14 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich.³⁹ In diesen Branchen wird die Direktelektrifizierung die kostengünstigste Klimaschutzlösung für Heizprozesse im Niedertemperaturbereich sein.

Es wird auch eine stärkere Zusammenarbeit zwischen der Industrie und dem Bausektor erwartet. Zum Beispiel kann die Industrie überschüssige Wärme in das Fernwärmesystem einspeisen, das Gebäude mit Heizwärme versorgt, und im Gegenzug Kühlleistung erhalten. Rechenzentren etwa haben einen ständigen Kühlbedarf und erzeugen eine Menge Abwärme, die sonst ungenutzt bliebe. Wärmepumpen könnten die Temperaturdifferenz nutzen und die zugeführte Heiz- und Kühlleistung mittels Strom erhöhen. Im Low Emissions Scenario wird erwartet, dass der Stromanteil in der Industrie im Laufe des Zeitraums weltweit von 28 % auf 41 % steigt (Abbildung 13).

4 WENIGER EMISSIONEN DURCH ELEKTRIFIZIERUNG BEI GLEICHZEITIG HÖHEREM ANTEIL AN ERNEUERBAREN ENERGIEN IM STROMMIX

Wenn es gelingen soll, die globale Erwärmung zu begrenzen, bleibt uns nicht mehr viel Zeit. Um das im Low Emissions Scenario vorgegebene Tempo beizubehalten, müssen die Länder gleichzeitig die Dekarbonisierung des Stromsektors und die Umstellung von fossilen Brennstoffen auf Elektrifizierung vorantreiben. Eigenen Analysen und externen Recherchen zufolge werden Elektrofahrzeuge mit dem aktuellen europäischen Strommix in der Ökobilanz schon heute weniger als die Hälfte der Treibhausgase ausstoßen als ein Dieselfahrzeug. Mit einem emissionsarmen Energiesektor wie in Skandinavien und Frankreich werden die Emissionen mit einem Elektroauto im Vergleich zu einem Dieselauto um mehr als 80 % reduziert. Das liegt daran, dass der Elektromotor so effizient ist, dass fast die gesamte Energie in den Antrieb fließt, während bei Motoren mit fossilen Brennstoffen mehr als zwei Drittel der Energie verloren gehen. Der Strommix in Europa und auf der Welt wird durch den Ausbau von Solar- und Windenergie zusehends grüner. Dadurch wird der positive Effekt auf das Klima mit dem Umstieg von mit fossilen Brennstoffen betriebenen Fahrzeugen auf Elektrofahrzeuge deutlich erhöht.

Die gleiche Konsequenz gilt auch für das Heizen mit Elektrowärmepumpen anstelle von Gas. Wärmepumpen können bei gleichem Energieverbrauch drei- bis viermal mehr Wärme erzeugen als herkömmliche Heizungskessel.

In Europa wird der Stromsektor durch das EU-Emissionshandelssystem (ETS) reguliert, bei dem es eine Obergrenze für die verfügbaren Zertifikate gibt. Ein steigender Strombedarf im Verkehr und in Gebäuden führt daher zu einer Verlagerung von Emissionen aus den Sektoren ohne Emissionszertifikate in einen Sektor mit Emissionszertifikaten. Das bedeutet, dass Elektrofahrzeuge und Elektrowärmepumpen die Treibhausgasemissionen in die Sektoren mit Deckelung des EU-Emissionshandels verlagern und gleichzeitig Emissionen verringern. Wenn die fortschreitende Elektrifizierung zusätzliche Kapazitäten für die Stromerzeugung erfordert, werden neue Solar- und Windkraftanlagen die wirtschaftlichsten Alternativen hierfür sein (Abbildung 9).

Die Elektrifizierung bei gleichzeitiger Entwicklung eines immer umweltfreundlicheren Stromsektors wird damit zu einer sozioökonomisch interessanten Option und zu einer Notwendigkeit, um die Klimaschutzziele zu erreichen.



Erneuerbarer Wasserstoff und erneuerbares Ammoniak sind überall dort attraktive Klimaschutzlösungen, wo die direkte Elektrifizierung eine Herausforderung darstellt.

Der emissionsfreie Wasserstoff entwickelt sich zu einer günstigen Alternative in Bereichen, in denen eine direkte Elektrifizierung schwierig ist. Mehrere Länder haben sich im vergangenen Jahr intensiver mit der Rolle von Wasserstoff befasst, und die EU hat ihre eigene Wasserstoffstrategie vorgestellt.

Die Dekarbonisierung über Direktstrom ist in einigen Sektoren und Anwendungsbereichen nicht geeignet oder wirtschaftlich nicht sinnvoll. Beispiele wären der Transport schwerer Lasten über große Entfernungen, Hochtemperaturprozesse und chemische Prozesse in der Industrie. In solchen Fällen werden die Treibhausgasemissionen durch eine Kombination aus emissionsfreiem Wasserstoff, Bioenergie, CO₂-Abscheidung mit Nutzung bzw. Speicherung, Verbesserungen der Energieeffizienz und Kreislaufwirtschaft reduziert. Die Wettbewerbsfähigkeit dieser Lösungen hängt von dem jeweiligen Anwendungsbereich ab und wird größtenteils von den CO₂-Preisen und politischen Maßnahmen beeinflusst. Da jedoch die Kosten für Strom aus erneuerbaren Energien sinken, wird voraussichtlich Wasserstoff aus dem Elektrolyseverfahren im Vergleich zu den fossilen Alternativen in diesen Bereichen immer wettbewerbsfähiger werden.

Wasserstoff kann branchen- und anwendungsübergreifend transportiert und eingesetzt, langfristig gelagert und bei chemischen Reaktionen, wie etwa in der Petrochemie und Ammoniakindustrie, genutzt werden. Zudem entstehen bei dessen Verwendung keine Emissionen. Somit besitzt Wasserstoff verschiedene Eigenschaften, die sich mit der Nutzung von Direktstrom ergänzen. Wasserstoff, der aus erneuerbarer Energie und Wasser hergestellt wird, ist sogenannter „grüner Wasserstoff“. Er ist sowohl bei der Herstellung als auch bei der Nutzung emissionsfrei, während Wasserstoff, der aus fossilen Brennstoffen mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung hergestellt wird, zu etwa 90 % emissionsfrei sein kann (auch als „blauer Wasserstoff“ bezeichnet).

Heute werden bereits rund 117 Millionen Tonnen Wasserstoff erzeugt – vor allem aus Erdgas und Kohle. Wasserstoff wird derzeit in der Industrie eingesetzt und ist weltweit für über 2 % der durch den Energieverbrauch verursachten CO₂-Emissionen verantwortlich. Im Low Emissions Scenario wird angenommen, dass die Industrie ihre Emissionen reduzieren muss und dass ein größerer Teil des heutigen auf fossilen Brennstoffen basierenden Wasserstoffs emissionsfrei erzeugt werden wird. Im Rahmen der neuen Industriestrategie der EU sieht die Europäische Kommission vor, den Innovationsfonds aus dem Emissionshandelssystem zu nutzen, um Anreize zur Emissionsminderung in der energieintensiven Industrie zu schaffen.⁴⁰ Eines der Ziele ist es, eine emissionsfreie Stahlindustrie zu erreichen. Die Stahlindustrie verursacht derzeit rund 22 % der industriellen CO₂-Emissionen in der EU. Es könnte möglich sein, Wasserstoff anstelle von Kohle als CO₂-Reduktionsmittel für die gesamte Eisen- und Stahlproduktion sowie für einige der Erhitzungsverfahren zu verwenden.⁴¹

Bei den schwereren Fahrzeugen wird im Low Emissions Scenario davon ausgegangen, dass Elektrofahrzeuge, die entweder mit Wasserstoff-Brennstoffzellen oder Batterien betrieben werden, 2050 den Markt anführen werden. Eine Analyse der Lebenszykluskosten zeigt, dass sowohl strom- als auch wasserstoffbetriebene Lkws ab Ende der 2020er Jahre den Wettbewerb mit Diesel-Lkws standhalten werden. Mit Wasserstoff bzw. Batterie betriebene Lkws werden sich je nach Fahrstrecke, Zuladung und Einsatzdauer in unterschiedlichen Anwendungsbereichen gegenseitig ergänzen. Erdgas, Energieeffizienz, Hybrid-Lkws und die Mischung von Biokraftstoffen und synthetischen Kraftstoffen werden beim Übergang zu emissionsfreien Lkws eine entscheidende Rolle spielen.

Im vergangenen Jahr haben mehrere Länder ihr Augenmerk stärker auf Wasserstoff gerichtet. Unter anderem haben Deutschland, Norwegen und die EU ihre eigenen Wasserstoffstrategien für 2020 auf den Weg gebracht.⁴² Die EU hat ein Konzept für den Aufbau einer europäischen Wasserstoffindustrie entworfen: Bis 2024 sollen Elektrolyseure mit mindestens 6 GW und bis 2030 mit mindestens 40 GW Leistung zur Herstellung von grünem Wasserstoff zur Verfügung stehen und bis 2050 die Technologie für grünen Wasserstoff in großem Maßstab eingesetzt werden, etwa in der Stahl- und Chemieindustrie.

Laut der deutschen Strategie wird Wasserstoff aus erneuerbaren Energien die langfristig nachhaltige Lösung sein, während emissionsfreier Wasserstoff aus z. B. Erdgas (blau) in einer Übergangszeit für Deutschland von Bedeutung sein wird. Zudem wird erwartet, dass Länder mit emissionsfreiem Wasserstoff handeln können. Im Low Emissions Scenario wird der emissionsfreie Wasserstoff bis 2050 6 % des gesamten Endenergiebedarfs der Welt decken.

Kostenentwicklung für Wasserstoff aus erneuerbarer Energie

Grüner Wasserstoff aus erneuerbarer Energie kann in Gebieten mit ausreichend erneuerbaren Ressourcen bereits mit blauem Wasserstoff konkurrieren. In den letzten fünf Jahren sind die Kosten für Elektrolyseure um mehr als 30 % gesunken und werden voraussichtlich weiter fallen, da sie immer häufiger eingesetzt werden (Abbildung 15).

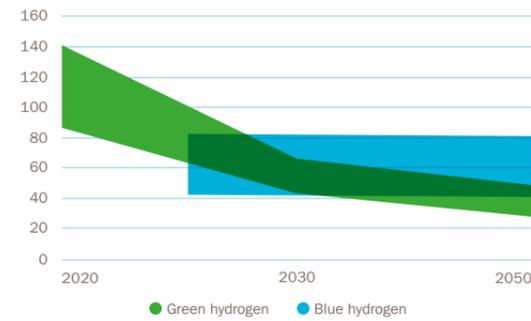
Grüner Wasserstoff ist derzeit 50-100 % teurer als Wasserstoff, der mit fossiler Energie ohne CO₂-Abscheidung erzeugt wird. Es wird angenommen, dass blauer und grüner Wasserstoff sich gegenseitig ergänzen und nicht in Wettbewerb zueinander stehen. Blauer Wasserstoff wird vorwiegend in großem Maßstab und zentral hergestellt, während grüner Wasserstoff in der Regel in kleinerem Maßstab, oft vor Ort und in der Nähe der Verbraucher erzeugt wird.



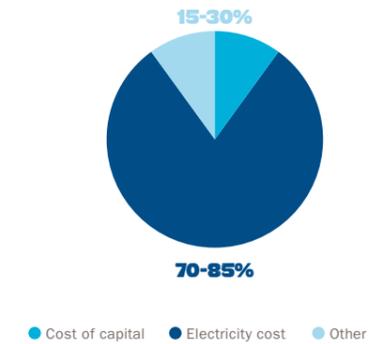
CELSA UND STATKRAFT unterzeichneten eine Vereinbarung mit dem Ziel, eine komplette Wertschöpfungskette für grünen Wasserstoff in der Stahlproduktion zu entwickeln.



15 Low Emissions Scenario zur Kostenentwicklung für grünen und blauen Wasserstoff (EUR/MWh)*



16 Kosten für grünen Wasserstoff im Jahr 2050 nach Kostenarten (%)



Aufgrund seiner geringen Energiedichte hat er ein größeres Volumen. Daher wird sowohl der Transport als auch die Speicherung von Wasserstoff eine Herausforderung und mit hohen Kosten verbunden sein. Bestehende Salzkavernen gelten als geeignet für die großvolumige Wasserstoffspeicherung. Zudem kann der Um- und Ausbau von Pipelines eine Alternative für den Transport großer Wassermengen sein. In ihrem jetzigen Zustand sind die meisten Erdgaspipelines nicht für hohe Wassermengen geeignet und es sind erhebliche Investitionen in die Infrastruktur erforderlich. Unsere Analysen zeigen, dass es sich im Allgemeinen lohnen wird, Wasserstoff mit erneuerbarer Energie dort zu erzeugen, wo er gebraucht wird – vorausgesetzt, erneuerbare Energien stehen zur Verfügung.

Kostensenkungen bei erneuerbaren Energien und Elektrolyseuren werden es ermöglichen, dass grüner Wasserstoff bereits ab 2030 in einigen Anwendungsbereichen mit fossilem Wasserstoff konkurrieren kann. Der Strompreis ist ein wichtiger Kostenfaktor und könnte im Jahr 2050 durchschnittlich 70-85 % der Kosten ausmachen (Abbildung 16). Neuere Modelle von Elektrolyseuren sind so konzipiert, dass sie flexibel und effizient arbeiten. Sie können daher für die erforderliche Flexibilität sorgen, indem sie den Strombedarf auf Zeiten mit hoher Solar- oder Windstromerzeugung verlagern.**

Sektorkopplung durch Elektrifizierung für ein flexibles Energiesystem

Sektorkopplung bedeutet im weitesten Sinne, dass alle Sektoren mit hohem Energieverbrauch enger mit dem Stromsektor verknüpft werden. Damit wird der Stromsektor zu einem immer wichtigeren Teil des Energiesystems.

Die Energie aus dem Stromsektor wird in zunehmendem Maße in Gebäuden, in der Industrie und im Verkehr genutzt werden, entweder durch direkte Elektrifizierung oder durch den Einsatz von Wasserstoff/Ammoniak als Energieträger. Zudem wird der Energiebedarf aus den Bereichen Gebäude, Industrie und Verkehr in Zukunft wesentlich flexibler sein als die bisherige Nachfrage auf dem Strommarkt, sodass die Sektorkopplung zu einer völlig neuen Dynamik im Stromsektor führen wird.

Dabei könnte die Sektorkopplung durch intelligente Ladelösungen für die dringend benötigte kurzfristige

Flexibilität im Stromsystem sorgen. Pkws bleiben rund 95 % ihrer Lebenszeit ungenutzt stehen. Dies gilt auch für Elektroautos. Derzeit gibt es über 7 Millionen Elektroautos auf der Welt, wobei die Verkaufszahlen im Jahr 2019 um 6 % gestiegen sind. Selbst während der Coronapandemie haben die Automobilhersteller weiter den Schwerpunkt auf Elektrofahrzeuge gelegt. Volvo hat sich zum Ziel gesetzt, dass 2025 50 % der verkauften Neuwagen Elektrofahrzeuge sind. Das Unternehmen geht sogar davon aus, dass der Trend hin zur Elektrifizierung durch die Coronakrise beschleunigt wird.⁴³ Die Gesamtinvestitionen in die Herstellung von Elektroautos in der EU waren 2019 19 Mal höher als 2018 und beliefen sich auf rund 60 Milliarden Euro. Zwei Drittel der Investitionen entfielen auf Deutschland, wovon 20 % in die Herstellung von Autobatterien flossen. Volkswagen beispielsweise wird seine Elektroauto-Herstellung in Europa innerhalb von zwei Jahren auf 745.000 Elektroautos im Jahr 2021 verfünffachen und wird ab 2029 75 verschiedene Elektroauto-Modelle auf die Straße gebracht haben.⁴⁴ Im Low Emissions Scenario werden 2050 mehr als 1,4 Milliarden Elektroautos auf den Straßen der Welt unterwegs sein. Dies entspricht einer Batteriespeicherkapazität von rund 19.000 GWh, die unter anderem von Faktoren wie autonomes Fahren und Reichweite abhängt. Die Batteriespeicherkapazität in Elektrofahrzeugen wird demnach mithilfe von intelligenten Ladelösungen eine interessante Möglichkeit zur Flexibilisierung des Stromsystems darstellen.

Durch intelligentes Laden kann ein erheblicher Teil des Strombedarfs aus dem Verkehrssektor auf Tageszeiten mit hohem Solar- und Windstromeinsatz und/oder geringem sonstigen Verbrauch verlagert werden. Zudem wird es irgendwann auch wirtschaftlich sinnvoll sein, dass Batterien Strom ins Netz zurückspeisen. Intelligenter und flexiblere Lösungen zur Bedarfssteuerung, wie z. B. intelligentes Laden, bieten eine praktikable Möglichkeit, den Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Strommix deutlich zu erhöhen. So wird in Zeiten mit wenig Wind und Sonne die Nachfrage gesenkt und in Zeiten mit viel Wind und Sonne die Nachfrage erhöht, wodurch seltener Zwangsabschaltungen vorgenommen werden müssen. Zudem können durch die Abflachung der Bedarfsspitzen die mit dem Netzausbau verbundenen Gesamtkosten gesenkt werden.

Andernfalls werden zusätzliche Bedarfsspitzen durch das Laden von Elektroautos erhebliche Erweiterungen und Investitionen in das Stromnetz nach sich ziehen. Der Einsatz von intelligenten Ladesystemen kann den

* IHS- und Statkraft-Analysen. 100-MW-PEM-Elektrolyseur mit einem Wirkungsgrad von 72 %. EUR/MWh. Die Kosten für blauen Wasserstoff sind nicht absehbar und hängen von den Kosten für den Transport und die Speicherung von CO₂ ab.

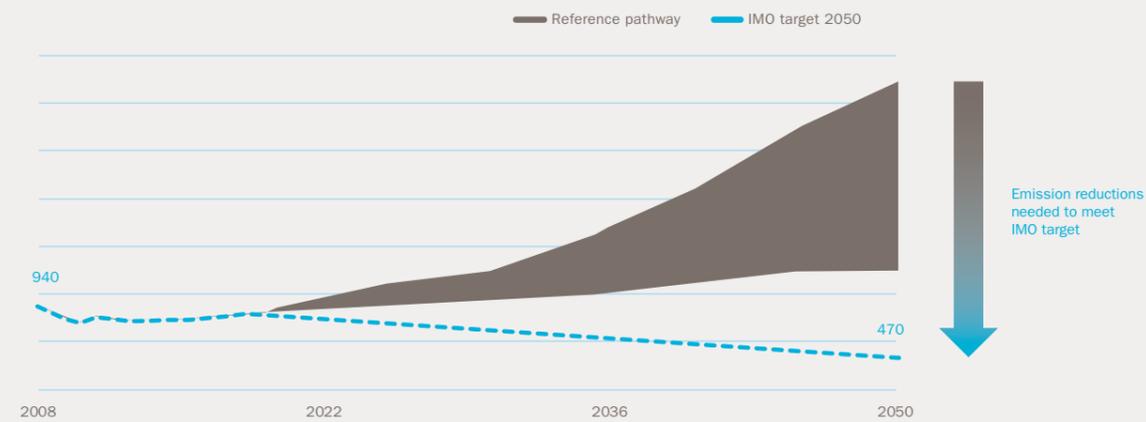
** Heute sind hauptsächlich zwei Elektrolysetechnologien im Einsatz: PEM-Elektrolyse (Polymer Electrolyte Membrane oder Protonen-Austausch-Membran genannt) und alkalische Elektrolyse.

5

DEKARBONISIERUNG DER SCHIFFFART MIT GRÜNEM AMMONIAK

Die Schiffsverkehrsbranche steht vor großen Herausforderungen, wenn sie das in der International Maritime Organization (IMO) vereinbarte Ziel erreichen will, die Treibhausgasemissionen bis 2050 gegenüber 2008 zu halbieren. Die Abgase der internationalen Schifffahrt machen 2-3 % der weltweiten CO₂-Emissionen aus.

17 Erforderliche Emissionseinsparungen in der Schifffahrt zur Erfüllung des IMO-Klimaziels im Jahr



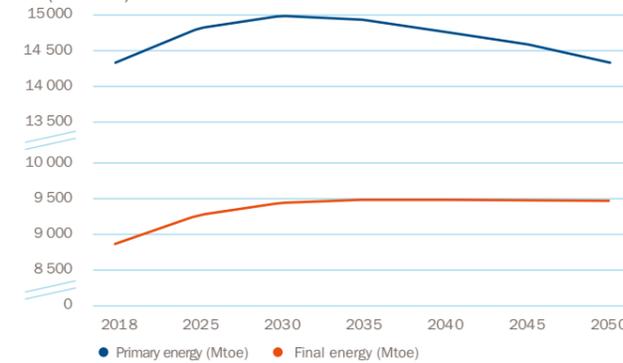
Da das heute in der Schifffahrt verwendete Schweröl billig ist und eine hohe Energiedichte aufweist, ist nicht davon auszugehen, dass alternative kohlenstoffarme und kohlenstofffreie Kraftstoffe ohne CO₂-Bepreisung und politische Anreize damit künftig konkurrieren können. Die meisten CO₂-neutralen Kraftstoffe stoßen hinsichtlich Volumen- und Gewichtsbeschränkungen an ihre Grenzen. Vollständig batteriebetriebene Schiffe eignen sich am besten für kurze, planbare Fahrten, wie bei Fähren oder Flussschiffen. Der Speicherraum für komprimierten Wasserstoff wird bei längeren Strecken eine Herausforderung darstellen. Flüssiger Wasserstoff ist zwar eine Alternative, aber vermutlich ist diese nicht so günstig wie erneuerbares (grünes) Ammoniak. Der Grund: Schiffe, die mit flüssigem Wasserstoff betrieben werden, sind teurer und Ammoniak hat eine wesentlich höhere Energiedichte als flüssiger Wasserstoff. Ammoniak ist ein Wasserstoffträger, der einfacher zu speichern und zu verteilen ist als flüssiger Wasserstoff (Abbildung 18).

Grünes Ammoniak erweist sich in vielen Bereichen als einer der besten CO₂-neutralen Kraftstoffe für den Langstreckenverkehr. Weder bei der Herstellung noch bei der Nutzung verursacht grünes Ammoniak Treibhausgase. Zudem kann es als Kraftstoff oder als Rohstoff für die Düngemittelherstellung verwendet werden. Bei der Herstellung werden Stickstoff und erneuerbarer Wasserstoff in einem Haber-Bosch-Verfahren in Ammoniak (NH₃) umgewandelt. Bei der Verbrennung von Ammoniak in einem Verbrennungsmotor entstehen Stickoxide (NO_x), die mit einem Katalysator verarbeitet werden müssen – ähnlich wie bei der heutigen Dieselschiffen. Grünes Ammoniak kann auch direkt in einer Brennstoffzelle verwendet werden. In Brennstoffzellen entstehen keine Stickoxide, und der Wirkungsgrad ist höher als bei Verbrennungsmotoren. Daher ist zu erwarten, dass diese Variante in vielen Anwendungsbereichen langfristig die beste Option sein wird. Im Übrigen kann Ammoniak auch wieder in Wasserstoff umgewandelt werden, aber aufgrund von Energieverlusten und Kosten ist dies in den meisten Fällen nicht so günstig wie vor Ort erzeugter Wasserstoff. Es wird davon ausgegangen, dass die Kosten für grünes Ammoniak sinken werden, sobald die Kosten für erneuerbare Energien und eine entsprechende Ausstattung wie Elektrolyseure und Haber-Bosch-Anlagen sinken.

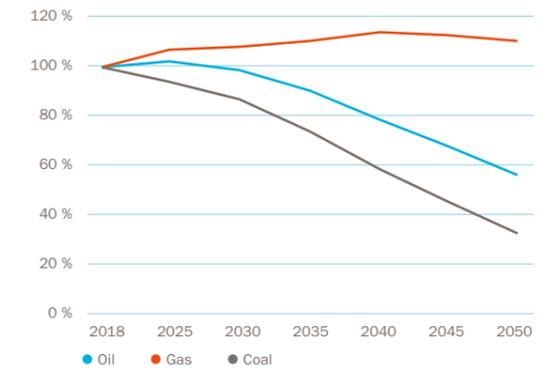
18 Kosten für die Herstellung, Speicherung und Transport von flüssigem Wasserstoff (L-H₂) und grünem



19 Bedarf an Primärenergie und Endenergie von heute bis 2050 (Mtoe). Der Primärenergiebedarf wird 2050 auf dem gleichen Niveau wie heute liegen (blaue Linie), während die Endenergie vom heutigen Stand aus ansteigen wird (rote Linie).



20 Bedarf an fossilen Brennstoffen bezogen auf 2018.



Investitionsaufwand im Versorgungsnetz im Zuge der Verbreitung von Elektrofahrzeugen zwischen 40 % und 90 % reduzieren, abhängig von der Region und den Eigenschaften des Stromnetzes, so IRENA.⁴⁵

Eine Sektorkopplung über die Elektrifizierung von Gebäuden bietet ähnliche Vorteile für die Energiesysteme. Die intelligente Warmwasserversorgung und Heizung von Gebäuden bedeutet, dass der Wärmebedarf teilweise auf Zeiten mit hoher Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien oder niedrigem sonstigen Verbrauch und damit verbundenen niedrigeren Strompreisen verlagert wird. Der Heizbedarf hat ein saisonales Profil, das den Temperaturverläufen in der Region entspricht. Im Allgemeinen ist der Heizbedarf in der nördlichen Hemisphäre deshalb im Winter größer als im Sommer. Unsere Analysen zeigen, dass durch die Einführung einer intelligenteren Lösung zum Heizen mit Strom in Europa die Treibhausgasemissionen aus dem Gebäudesektor um 1 bis 2 % gesenkt werden können. Dazu wird ein größerer Teil des Strombedarfs in die Zeiträume verlagert, in denen die Stromerzeugung innerhalb eines Tages stark schwankt. Gleichzeitig wird der Bedarf an Batteriespeichern im Energiesystem um 5 % verringert.*

Entscheidend für die kurzfristige Flexibilität werden demnach das intelligente Laden von Elektroautos und das intelligente Heizen von Gebäuden sein. Diese bieten zwar Flexibilität innerhalb von 24 Stunden, dennoch lösen sie nicht das Problem, Strom über längere Zeiträume zu speichern (Langzeitflexibilität), wenn die Stromerzeugung durch Wind und Sonne mehrere Tage lang sehr gering ist. Doch es gibt hierfür eine geeignete Maßnahme: Mit erneuerbarer, flexibler Wasserkraft lässt sich eine derartige langfristige Flexibilität erreichen. Nur wenigen Ländern steht diese Option zur Verfügung, aber mit der Zeit wird die Sektorkopplung über emissionsfreien Wasserstoff auch langfristige Flexibilität schaffen. Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien zu niedrigen (oder negativen) Strompreisen hergestellt wird, kann eine interessante und flexible Dekarbonisierungslösung für den Einsatz in Verkehr, Industrie und Gebäuden sein. Außerdem könnte emissionsfreier Wasserstoff wieder in Strom umgewandelt werden und das Energieversorgungssystem so flexibler machen – ähnlich wie heute das Erdgas. Angesichts der Leistungsverluste bei der Umwandlung von Strom in Wasserstoff und zurück in Strom, wird dies jedoch eine relativ teure Flexibilitätslösung sein. Wasserstoff zur Stromerzeugung kann entweder in Gasturbinen (CCGT, OCGT) oder in Brennstoffzellen eingesetzt werden. Mit einem Wirkungsgrad von etwas mehr

als 50 % geht fast die Hälfte der Energie im Prozess verloren, wenn die Wärme nicht genutzt wird. Wenn bei Brennstoffzellen Strom und Wärme kombiniert werden, lässt sich ein Wirkungsgrad von etwa 90 % erreichen, wobei ca. 50 % für Strom und ca. 40 % für die Wärmerückgewinnung genutzt werden können. Schon jetzt ist es möglich, in bestehenden Gaskraftwerken ohne Nachrüstung rund 20 % Wasserstoff beizumischen. So lassen sich die Emissionen zwar etwas reduzieren (5-7 %), aber die Kosten steigen und der Wirkungsgrad des Kraftwerks nimmt ab. Deshalb müssen die Kraftwerke zur weiteren Beimischung entsprechend aufgerüstet werden.

Das Zwei-Grad-Ziel als Referenz für das Low Emissions Scenario

Selbst bei weltweit anhaltendem Bevölkerungswachstum wird im Low Emissions Scenario das Zwei-Grad-Ziel anvisiert. Der Bedarf an Kohle wird vor 2025 seinen Höhepunkt erreichen und danach wieder nachlassen. Für Öl wird der Spitzenwert etwa 2030 und für Gas etwa 2040 erwartet.

Noch immer ist die Welt auf fossile Energieträger angewiesen, und das stetige Bevölkerungswachstum treibt den Energiebedarf weiter in die Höhe. Energie aus fossilen Brennstoffen wird heute zur Erzeugung von Strom und Wärme, zum Transport von Menschen und Waren sowie in verschiedenen industriellen Prozessen eingesetzt. Im Low Emissions Scenario von Statkraft wird der Primärenergiebedarf bis in die 2030er-Jahre weiter zunehmen und dann allmählich zurückgehen, bevor er abflacht und gegen 2050 sinkt. Dies wird selbst bei anhaltendem Bevölkerungswachstum und Wirtschaftswachstum der Fall sein. Dabei sinkt der Energieverbrauch in der Wirtschaft, und der Bedarf an Primärenergie wird 2050 auf dem gleichen Niveau wie heute liegen. Allerdings wird der Endenergiebedarf im betrachteten Zeitraum des Low Emissions Scenarios noch um 7 % ansteigen. Demnach geht bei den Umwandlungsprozessen von Primär- in Endenergie im Jahr 2050 weniger Energie verloren als heute (Abbildung 19 und Infobox 6). Aus fossilen Brennstoffen erzeugte Energie wird durch erneuerbare Energie ersetzt, und der Anteil fossiler Brennstoffe an der Primärenergie wird von heute 81 % bis 2050 auf 52 % sinken.**

MEHR

bedarfsorientierte Flexibilität. Die intelligente Warmwasserversorgung und Heizung von Gebäuden und intelligente Ladelösungen verlagern den Bedarf auf Zeiten mit hoher Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien oder geringem sonstigen Verbrauch.

*Annahmen der Analyse: Hoher Heizbedarf und hohe Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wurden innerhalb eines Tages zeitlich dichter zusammengelegt. Gleiches gilt für Zeiträume mit niedrigem Heizbedarf und niedriger Stromerzeugung. So wird das Profil der Stromerzeugung und -nachfrage im Laufe des Tages ausgeglichen.

**Primärenergie bezeichnet die Menge der gewonnenen Energie vor Energieverlusten durch Umwandlung, Transformation und Verteilung an die Endverbraucher (weitere Details in Infobox 6).



6

PRIMÄRENERGIE: DIFFERENZ DURCH UNTERSCHIEDLICHE ERFASSUNGSMETHODEN FÜR FOSSILE UND ERNEUERBARE ENERGIE

Ein häufiger Einwand gegen die Energiewende ist, dass 80 % des weltweiten Energiebedarfs derzeit aus fossilen Energiequellen stammen und nur 4 % aus erneuerbaren Quellen (gemessen in Primärenergie). Der stufenweise Ausstieg aus fossilen Brennstoffen mithilfe erneuerbarer Energien kann wie eine unlösbare Aufgabe erscheinen, wenn die Differenz so immens ist.

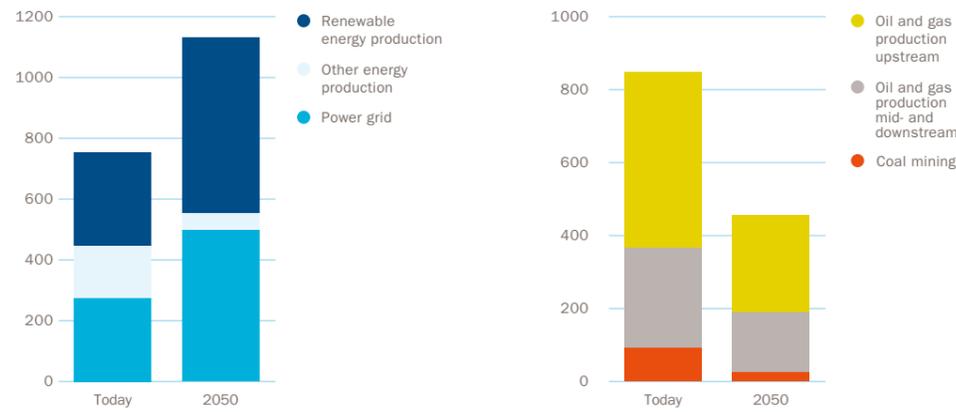
Primärenergie ist als Energieform definiert, die in der Natur vorhanden ist, aber noch keinen Umwandlungsprozessen durch den Menschen unterzogen wurde, zum Beispiel in einem Kraftwerk oder einem Auto. Alle theoretisch nutzbare Energie der jeweiligen Energiequelle wird in die Statistik aufgenommen. Das heißt, dass die fossilen Energiequellen in der Regel anhand der theoretischen latenten Energie bestimmt werden, während die erneuerbaren Energien anhand des erzeugten Stroms quantifiziert werden.

Was sich nach einem technischen Unterschied anhört, hat eine große Tragweite: Ein modernes Kohlekraftwerk hat einen Wirkungsgrad von 40 %, was bedeutet, dass 60 % der latenten Energie in der Kohle (die „Primärenergie“) bei der Umwandlung von Kohle in Strom verloren geht. In der Statistik führt der Umstieg von Kohlestrom auf Strom aus erneuerbaren Energien zu einem um 60 % geringeren Energiebedarf, ohne dass sich der tatsächliche Endverbrauch von Strom geändert hätte. Der Verlust bei der Nutzung fossiler Brennstoffe ist die Wärme, die an die Umgebung abgegeben wird.

Das bedeutet, dass für jede Einheit an Strom aus erneuerbaren Energien, mit der moderne Kohlekraft ersetzt wird, der Kohleverbrauch um 2,5 Einheiten sinkt. Für jede Einheit an Strom aus erneuerbaren Energien, die für den Betrieb eines Elektroautos verwendet wird, das ein Auto mit einem Verbrennungsmotor ersetzt, sinkt der Ölverbrauch um etwa 4 Einheiten. Heute macht die Kohleverstromung etwa 17 % des weltweiten Primärenergiebedarfs aus, während der Anteil der erneuerbaren Energien bei etwa 4 % liegt. Da eine Einheit an erneuerbaren Energien mehr als 2,5 Einheiten an Kohle ersetzen kann, muss die Menge an erneuerbaren Energien nicht um das Fünffache erhöht werden, um den gesamten Kohlestrom zu ersetzen. Der Anteil der erneuerbaren Energien muss „nur“ um etwa 70 % erhöht werden. Das im Transportwesen verwendete Öl macht derzeit etwa 21 % des Weltenergiebedarfs aus. Wenn die weltweite Produktion von erneuerbaren Energien um 50 % gesteigert wird, könnte dies theoretisch das gesamte im Verkehrssektor benötigte Öl ersetzen, vorausgesetzt, der gesamte Verkehrsbereich könnte auf Direktstrom umgestellt werden.

Doch momentan klafft noch eine große Lücke zwischen fossilen Brennstoffen und erneuerbaren Energien, und der Ausstieg aus fossilen Energieträgern stellt eine große Herausforderung dar. Dennoch muss darauf hingewiesen werden, dass das Problem oft extremer dargestellt wird, als es tatsächlich ist.

21 Investitionen in den Stromsektor (Grafik links) und in fossile Brennstoffe (Grafik rechts) in Mrd. USD pro Jahr von heute bis 2050 (USD 2020)



Im Low Emissions Scenario sind alle fossilen Energieträger von der Energiewende betroffen, wenn auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Als erstes und am stärksten wird die Kohle betroffen sein. Im Low Emissions Scenario erreicht der Kohlebedarf bereits vor 2025 seinen Höchststand, gefolgt von einem strukturellen Rückgang der Nachfrage bis 2050. Der Anteil der Kohle an der Primärenergie wird im Jahr 2050 bei 9 % stehen. Die Bedarfsspitze für Öl wird etwa fünf Jahre hinter der für Kohle liegen, und der Erdgasbedarf wird im Anschluss um 2040 seinen Höhepunkt erreichen. Die Nachfrage nach Erdgas wird ab heute um durchschnittlich 0,3 % pro Jahr zunehmen, nach 2040 aber wieder zurückgehen. In den Bereichen Gebäude, Verkehr und Industrie sowie als Ausgleich von Energiesystemen, insbesondere in längeren Perioden mit wenig Wind und Sonne, wird Erdgas auch weiterhin eine Rolle spielen. Im Low Emissions Scenario wird der Verbrauch von Kohle und Öl um 68 % bzw. 44 % sinken, während der Gasverbrauch ausgehend von heute um 10 % steigen wird (Abbildung 20).

Zudem werden die Investitionen in das Energiesystem im Low Emissions Scenario im Jahr 2050 mehr als doppelt so hoch sein wie die in fossile Energieträger (Abbildung 21). Der in den letzten Jahren zu beobachtende Trend wird sich fortsetzen, wobei sich die Investitionen von fossilen Energiequellen auf den Stromsektor und erneuerbare Energien verlagern werden (Abbildungen 2 und 3). Erwähnenswert ist auch, dass das Gesamtinvestitionsvolumen in das Energiesystem 2050 trotz des Wirtschafts- und Bevölkerungswachstums in etwa auf dem gleichen Stand wie heute sein wird. Dies liegt einerseits an der Entkopplung von Energiebedarf und Wirtschaftswachstum und andererseits an den sinkenden Technologiekosten für erneuerbare Energien.

Im Low Emissions Scenario wird die sinkende Nachfrage nach allen fossilen Brennstoffen bis 2050 die globalen durch den Energieverbrauch bedingten CO₂-Emissionen um 47 % verringern und im Jahr 2050 bei 17,6 Gt CO₂ liegen. Der Stromsektor verursacht heute den Großteil der durch den Energieverbrauch bedingten CO₂-Emissionen und wird daher mit 70 % in diesem Zeitraum am meisten Emissionen einsparen. Die Emissionen des Stromsektors werden allmählich zurückgehen, da Kohle- und später Gaskraft durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Der Industriesektor ist heute der zweitgrößte CO₂-Verursacher, wobei sein Anteil im Laufe des Zeitraums weiter zulegen wird. Im Verkehrssektor wird heute hauptsächlich Erdöl als Energieträger

eingesetzt, wodurch er der drittgrößte Verursacher von Emissionen ist. Die Emissionen aus den Bereichen Verkehr und Gebäude werden in diesem Zeitraum um etwa 50 % sinken, während die Emissionen aus der Industrie um ein Viertel zurückgehen werden.

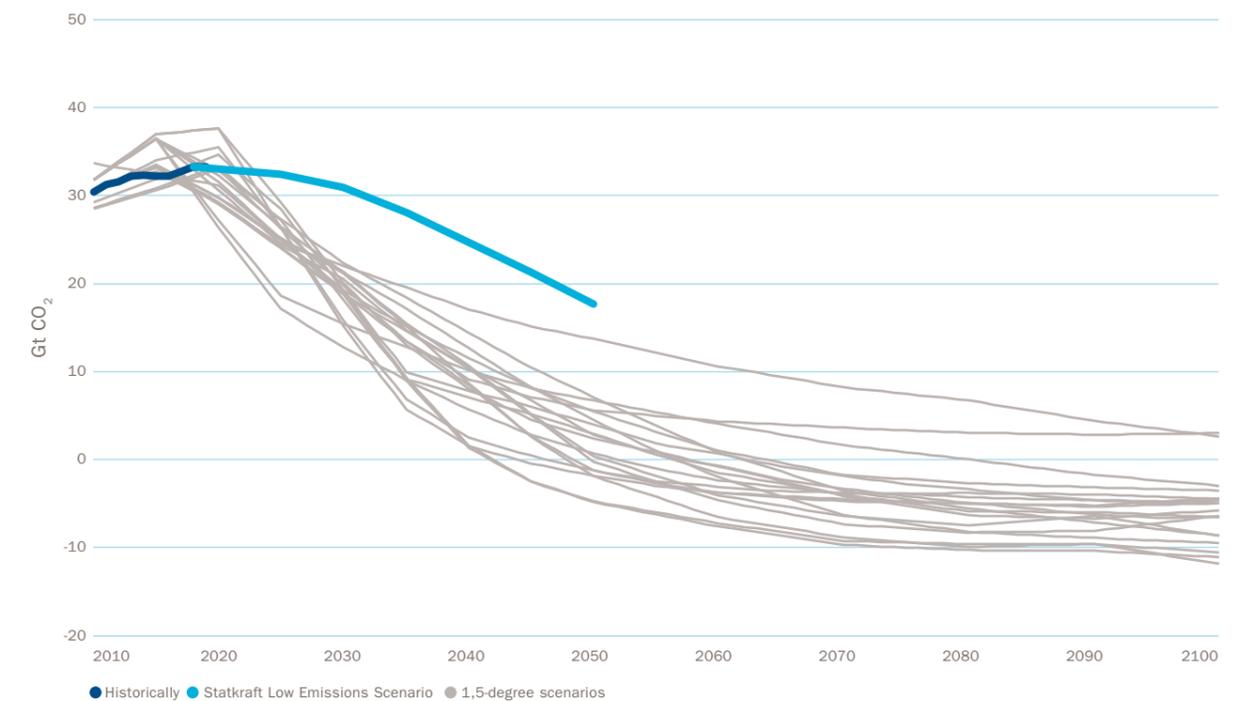
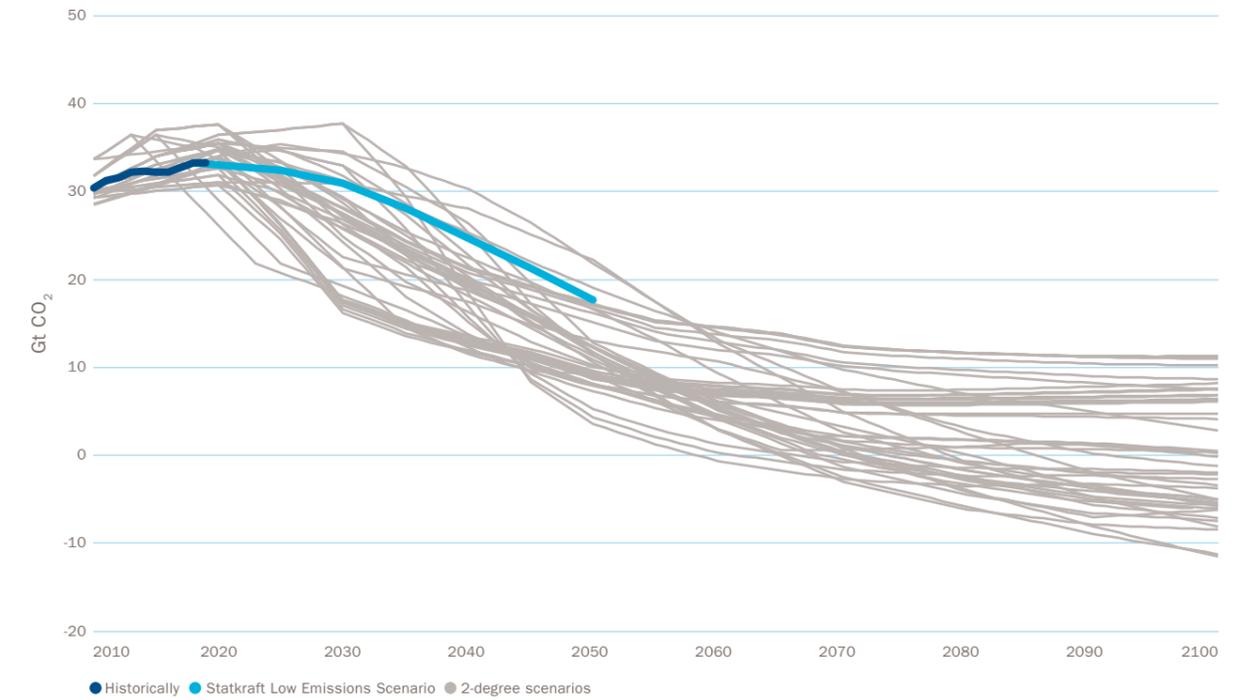
Das bedeutet, dass die durch den Energieverbrauch verursachten CO₂-Emissionen im Low Emissions Scenario mit dem Zwei-Grad-Ziel des IPCC übereinstimmen, aber der Rückgang der Emissionen immer noch nicht schnell bzw. stark genug ist, um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen (Abbildung 22)*. Der größte Unterschied zwischen dem Low Emissions Scenario und der Verfolgung des 1,5-Grad-Ziels ist die Entwicklungsgeschwindigkeit: Zwar sind die gleichen Lösungen vorgesehen, aber zum Erreichen des 1,5-Grad-Ziels müssen die Maßnahmen viel schneller umgesetzt werden, indem mehrere Technologien parallel entwickelt werden.

-44 %
 Ölbedarf sinkt um 44 % in diesem Zeitraum

17,6 GT
 Die globalen auf den Energieverbrauch zurückzuführenden CO₂-Emissionen werden in diesem Zeitraum um 47 % sinken und 2050 entsprechend des Zwei-Grad-Ziels bei 17,6 Gt

*Die 2-Grad- und 1,5-Grad-Ziele des IPCC wurden mithilfe verschiedener Integrated Assessment Models (IAMs) entwickelt, die unterschiedliche Annahmen für technologische und sozioökonomische Parameter treffen.

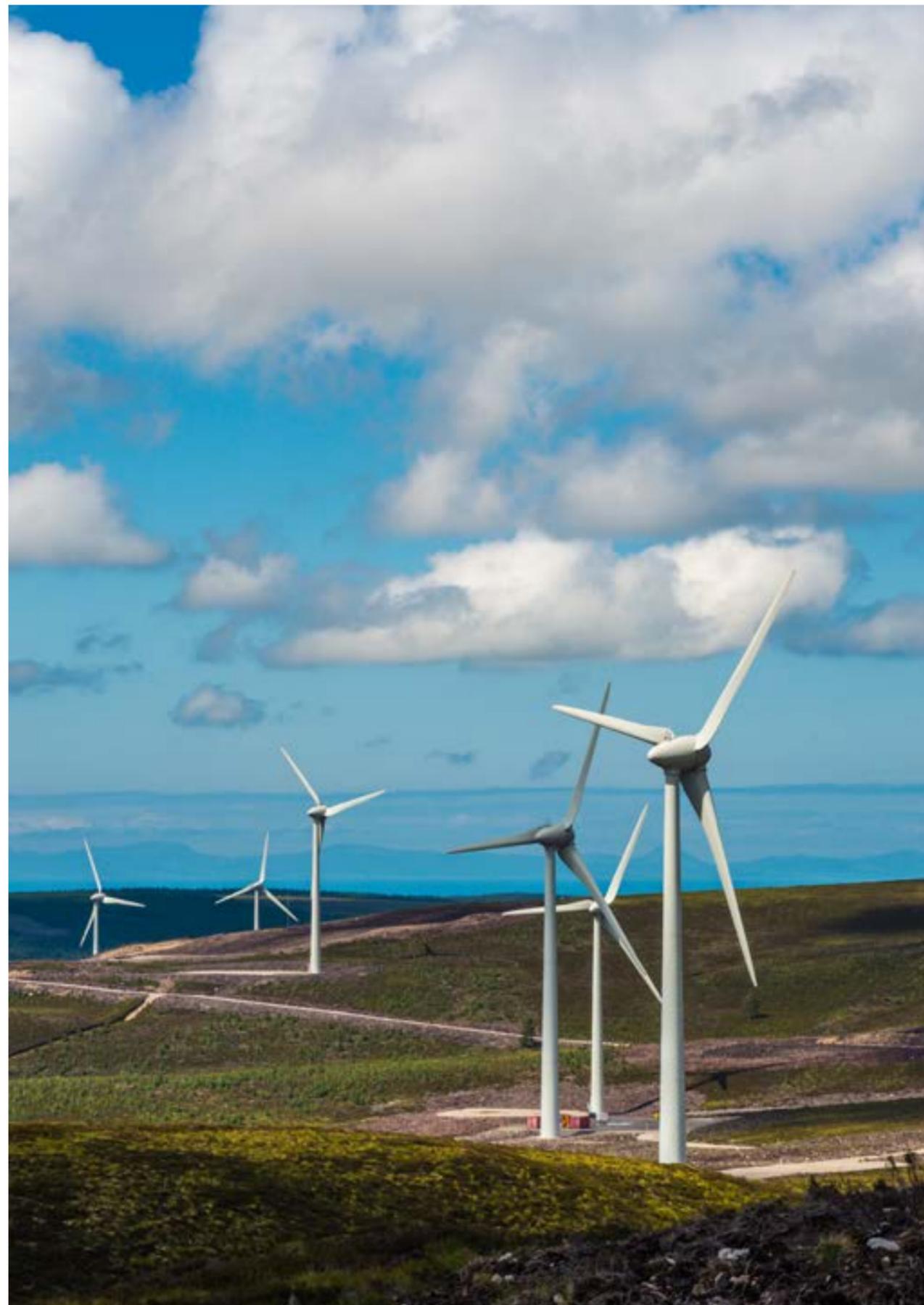
22 Jährliche auf den Energieverbrauch bezogene CO₂-Emissionen im Low Emissions Scenario von Statkraft im Vergleich zu anderen Zwei-Grad-Szenarien (oben) und 1,5-Grad-Szenarien (unten). Schließt Emissionen aus fossilen Energieträgern und Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung ein.^{46, *}



*Die oben gezeigten Grafiken wurden von Glen Peters, Forschungsleiter, CICERO, erstellt und stammen aus dem „IAMC 1.5°C Scenario Explorer“ und den Analysen von Statkraft.⁴⁶

3

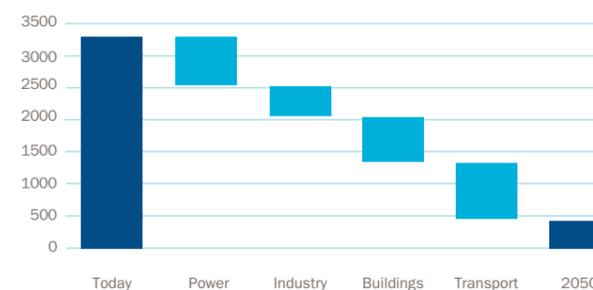
**WAS KANN DIE ENERGIEWENDE
VERLANGSAMEN ODER
BESCHLEUNIGEN?**



BERRY-BURN-WINDPARK in den schottischen Highlands

WAS KANN DIE ENERGIEWENDE VERLANGSAMEN ODER BESCHLEUNIGEN?

23 Low Emissions Scenario zu den Emissionssenkungen in Europa von heute bis 2050 pro Sektor (durch den Energiesektor verursachte CO₂-Emissionen in Mio. t)



Das Low Emissions Scenario von Statkraft geht davon aus, dass sich die Bereiche Politik, Wirtschaft und Technologie grundsätzlich in dieselbe Richtung bewegen. Sollte sich dies nicht bestätigen, könnte die globale Energiewende ineffizienter, teurer und langsamer werden. Dieses Kapitel befasst sich mit den Möglichkeiten und Hindernissen, die sich bei der europäischen Energiewende bis 2050 ergeben könnten, und deren Konsequenzen. Beispiele hierfür sind: Politische Klimaschutzziele, unterschiedliche Handhabung der CO₂-Bepreisung, Einschränkungen bei der Elektrifizierung in den Bereichen Verkehr und Heizung, langsamerer Kohleausstieg und vermehrter Widerstand gegen den Ausbau von Onshore-Windkraftanlagen.

In den letzten Jahren hat der europäische Energiesektor weniger CO₂-Emissionen verursacht. Wenn die EU ihre langfristigen Klimaschutzziele erreichen möchte, müssen jedoch auch in schwieriger zu beeinflussenden Sektoren und in Bereichen, die Verbraucher betreffen, Einschnitte vorgenommen werden. Damit die Emissionen in allen Sektoren schnell genug gesenkt werden können, müssen stärkere politische Maßnahmen ergriffen werden. Dies ist auch in der neuen, grünen Wachstumsstrategie der EU (dem europäischen Grünen Deal) berücksichtigt, die klare klimapolitische Ziele mit marktorientierten Lösungen verbindet. Die Wachstumsstrategie stellt Klimaschutz und Nachhaltigkeit als Schlüsselkomponenten in den Vordergrund und sieht ein klares soziales Engagement vor, um eine gerechte Energiewende sicherzustellen.

Andere wichtige Entwicklungen könnten die europäische Klimapolitik jedoch in eine andere Richtung lenken. Die Unterstützung populistischer Parteien hat in den letzten Jahren zugenommen. Die internationale Zusammenarbeit stößt auf Widerstand. Möglicherweise wird die Pandemie zu einer geringeren Unterstützung von Klimaschutzmaßnahmen und internationaler

Zusammenarbeit führen. Das Thema Klimaschutz rückt auf der politischen Agenda oftmals nach hinten, wenn andere, drängendere Krisen auftreten.

Doch bisher scheinen die Klimaschutzziele der EU durch die Coronapandemie nicht geschwächt worden zu sein. Das Konjunkturpaket der EU ist an umweltfreundliche Zwecke gebunden und das Thema Klimaschutz steht immer noch ganz oben auf der EU-Agenda. Dennoch gibt es immer noch Unklarheiten darüber, wie die Klimaschutzziele erreicht werden sollen und wie die Mitgliedsstaaten die Wachstumsstrategie umsetzen. Zugleich gibt es auf lokaler Ebene einen starken Widerstand gegen eine Reihe von bestimmten Klimamaßnahmen.

In diesem Kapitel wurde ein kostenoptimiertes Modell des Energiesystems für Europa herangezogen, um einen besseren Einblick in die Möglichkeit und Hindernisse der Energiewende zu gewinnen^{47,*}:

- Klimaschutzziele bis 2050: Wie wirken sich hoher, geringer und verspätete Klimaziele auf die Energiewende aus?
- CO₂-Bepreisung in Europa: Welche Folgen hat eine länder- und sektorübergreifende homogene bzw. differenzierte CO₂-Bepreisung?
- Hürden bei der Elektrifizierung: Wie werden sich diese auf die Energiewende auswirken?
- Langsamerer Kohleausstieg in Europa: Welche anderen Lösungen sind denkbar?
- Hürden beim Ausbau der Onshore-Windenergie: Was sind die Alternativen?

*Die in diesem Kapitel präsentierten Analysen wurden von Statkraft in Zusammenarbeit mit T. Burandt, K. Hainisch und K. Löffler (Technische Universität Berlin) durchgeführt.⁴⁷ Das Modell des Energiesystems setzt voraus, dass die sozioökonomischsten Lösungen für Europa gewählt werden. Die Kostenoptimierung wird regions- und branchenübergreifend angewendet. Dabei wird in den Analysen davon ausgegangen, dass es der EU gelingt, ihre Klimaschutzziele auch trotz weiterer Hürden zu erreichen. Dies gilt nicht für diejenigen, die sich mit alternativen Klimaschutzzielen beschäftigen. Die Ziele werden demnach nicht auf die Art und Weise erreicht, die wir für die kosteneffizienteste halten und die im Low Emissions Scenario angenommen wird.

7 DAS LOW EMISSIONS SCENARIO FÜR EUROPA – EINE WIRTSCHAFTLICHE ENERGIEWENDE

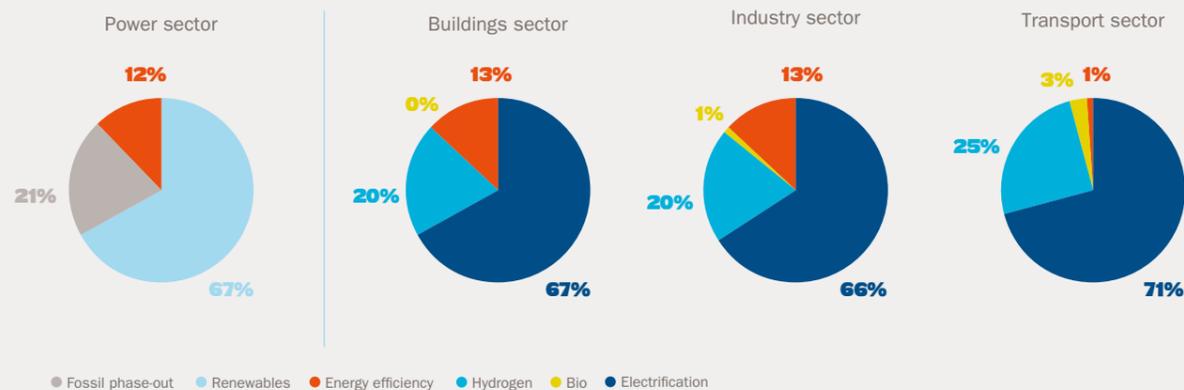
Im diesjährigen Low Emissions Scenario wird angenommen, dass der Energieverbrauch in der EU, wie im europäischen Grünen Deal vorgegeben, im Jahr 2050 zu 90 % dekarbonisiert sein wird. Es wird damit gerechnet, dass das Wirtschaftswachstum in Europa aufgrund der Coronakrise geringer ausfällt, wodurch der Bedarf an Energie und Strom stärker sinken wird als vor der Pandemie geschätzt.

Die wirtschaftliche Energiewende im Low Emissions Scenario wird in Europa bis 2050 zu einem fast vollständig dekarbonisierten Stromsektor mit einem Anteil von 95 % an Strom aus erneuerbaren Energien führen, wobei mehr als 80 % aus schwankenden Quellen stammen. Dabei wird die Hälfte der installierten Leistung im Stromsektor 2050 auf Solaranlagen entfallen – mit einem jährlichen Kapitalzuwachs von etwa 8 %. Die Windkraft wird etwas mehr als ein Drittel der Leistung bereitstellen und ein jährliches Wachstum von 6 % verzeichnen. In der Zwischenzeit wird der Strombedarf ab heute um rund 60 % steigen. Die größten Emissionsminderungen von heute bis 2050 werden durch den Energie- und Verkehrssektor erzielt (Abbildung 23).

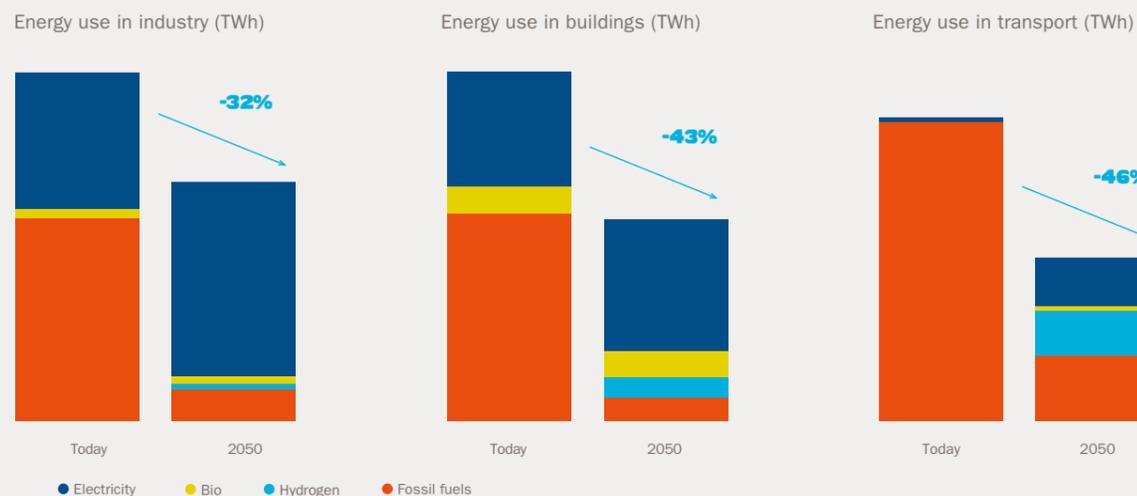
Im Energiesektor werden zwei Drittel der Emissionssenkungen durch erneuerbare Energien erzielt, etwa ein Fünftel durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung und der Rest durch Energieeffizienzsteigerungen. In den anderen Sektoren wird die Elektrifizierung die kostengünstigste Klimaschutzmaßnahme über den Zeitraum, die Regionen und die Sektoren hinweg sein. In den Analysen von Statkraft macht die Elektrifizierung mehr als zwei Drittel der Emissionssenkungen in den Sektoren Verkehr, Industrie und Gebäude aus. Emissionsfreier Wasserstoff trägt im Betrachtungszeitraum zu einem Fünftel zu den Emissionsminderungen im Bau- und Industriesektor und zu einem Viertel zu denen im Verkehrssektor bei. Der Beitrag von emissionsfreiem Wasserstoff zum Klimaschutz wird sich nach 2030 beschleunigen und 2050 bei einem Anteil von 12 % an der gesamten Endenergie in Europa liegen. Energieeffizienzsteigerungen und Bioenergie werden den Rest der Emissionsminderungen ausmachen (Abbildung 24).

Obwohl der Strombedarf steigen wird, wird der Endenergiebedarf insgesamt um 46 %, 43 % bzw. 32 % für Verkehr, Gebäude bzw. Industrie sinken (Abbildung 25). Dies liegt an der Energieeffizienz, dem Ersatz von fossilen Energiequellen durch Elektrizität und der

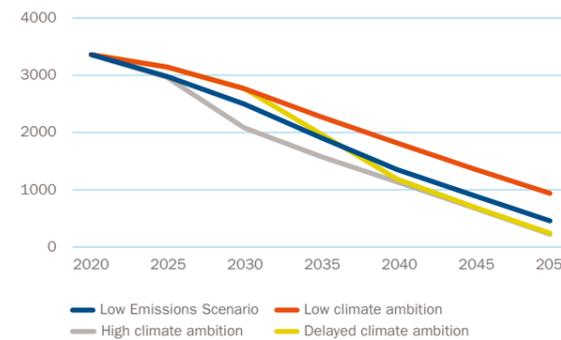
24 Kostenoptimale Dekarbonisierung pro Sektor in Europa von heute bis 2050 im Low Emissions Scenario. Industrie umfasst keine Rohmaterialien.



25 Endenergiebedarf im Low Emissions Scenario: heute und im Jahr 2050



26 Emissionsverläufe in Europa mit unterschiedlichen Klimaschutzziele (durch den Energieverbrauch bedingte CO₂-Emissionen in Mt).



Hohe, niedrige und verspätete Klimaziele bis 2050: Unvorhersehbarkeit hat ihren Preis

Eine verschleppte Umsetzung der Klimaschutzziele wird Europa sehr teuer zu stehen kommen, insbesondere weil es dadurch zu einem weiteren Ausbau von Kohle-, Gas-, Solar- und Windenergie kommen wird. Bis 2050 werden die Gesamtkosten für das Energiesystem in Europa 4 % höher sein als im Low Emissions Scenario angesetzt.

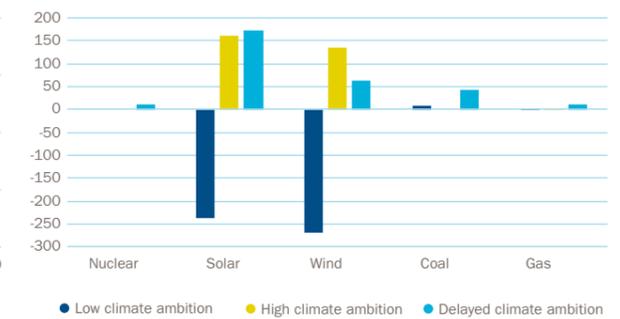
Die Klimaschutzziele für Europa von 2030 bis 2050 werden derzeit noch verhandelt. Die Auswirkungen verschiedener europäischer Klimaschutzziele auf die Energiewende wurden von Statkraft im Vergleich zum Low Emissions Scenario analysiert. Mehrere aktuelle Studien kommen zu dem Schluss, dass die EU-Länder ihre Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 gegenüber 1990 um 80 % bzw. 91-96 % verringern müssen, um das Zwei-Grad-Ziel bzw. das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen.⁴⁸ Die folgenden Entwicklungspfade der Emissionen wurden analysiert:

- **Niedrige Klimaziele:** Eine Energiewende in der EU, die das aktuelle Klimaziel von 40 % im Jahr 2030 und 80 % im Jahr 2050 weiterverfolgt.
- **Hohe Klimaziele:** Eine Energiewende in der EU, die das Klimaziel von 55 % im Jahr 2030 und 95 % im Jahr 2050 erreicht.
- **Verschleppte Klimaziele:** Eine langsamere Energiewende in der EU, bei der angenommen wird, dass das Klimaziel von 40 % im Jahr 2030 bestehen bleibt und nach 2030 eine Einigung über die Erhöhung des Ziels auf ein 95 % bis 2050 erfolgt.

Statkraft hat diese drei Szenarien mit dem Low Emissions Scenario verglichen, das von einem Klimaziel von 90 % im Jahr 2050 ausgeht.

Ein gniedriges Klimaziel in Europa wird eine langsamere Energiewende und einen europäischen Energiemix zur Folge haben, der nicht im Einklang mit der neuen Wachstumsstrategie der EU und dem Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2050 steht. Der Anteil erneuerbarer Energien im Energiesektor wird dennoch wesentlich höher ausfallen als heute, und zwar bis zu 93 % im Jahr 2050, wobei 76 % aus schwankenden Stromquellen stammen (TWh). Der Stromverbrauch wird gegenüber heute um etwa 40 % ansteigen, aber erheblich geringer ausfallen als im Low Emissions Scenario, da niedrigere Klimaschutzziele den Elektrifizierungsbedarf verrin-

27 Änderungen der installierten Leistung (GW) im Stromsektor in Europa für verschiedene Klimaschutzziele im Vergleich zum Niedrigemissionsszenario

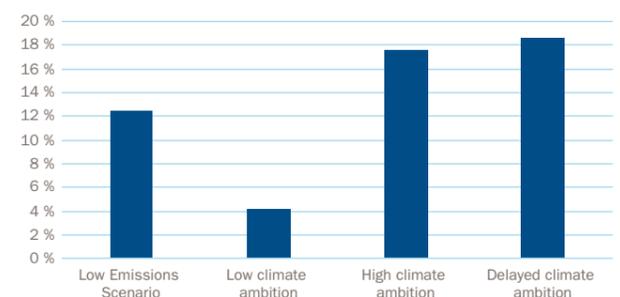


gern. Die Solar- und Windkraftkapazitäten werden im Vergleich zu heute weiter deutlich zunehmen, allerdings in einem langsameren Tempo. Die installierte Leistung von Solar- und Windkraftanlagen in Europa wird 2050 um 500 GW niedriger sein als im Low Emissions Scenario (Abbildung 27).

Neue Solar- und Windkraftanlagen werden den gesamten Zuwachs beim Stromverbrauch bis 2050 abdecken und gleichzeitig 87 % aller Kohle- und Gaskraftwerke ersetzen, die in diesem Zeitraum aus dem Strommix fallen werden. Die größten Emissionssenkungen gegenüber heute werden aus dem Strom- und Verkehrssektor kommen (Abbildung 29). Daher werden niedrig gesteckte Klimaschutzziele den Übergang im Verkehrssektor und bei Gebäuden verlangsamen. Emissionsfreier Wasserstoff wird im Jahr 2050 verglichen mit dem Low Emissions Scenario eine geringere Rolle spielen. Ab 2040 hingegen wird Wasserstoff in allen drei Szenarien an Bedeutung gewinnen (Abbildung 28).

Hohe Klimaziele in Europa werden mehr oder weniger das Gegenteil bewirken. In diesem Fall wird erwartet, dass die Klimaschutzziele von 55 % und 95 % zeitnah festgelegt werden und die Ziele für die Marktteilnehmer in diesem Zeitraum kalkulierbar sein werden. Die Dekarbonisierung des Stromsektors wird abgeschlossen sein. Der Anteil der erneuerbaren Energien wird im Jahr 2050 bei 96 % liegen, und es wird auch einige Nuklearkraftwerke und Biomassekraftwerke mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung geben, welche zu negativen Emissionen führen. 2050 werden mehr als 70 % der verbleibenden Emissionen auf den Verkehrssektor entfallen, da die letzten Vermeidungsmöglichkeiten im Verkehrssektor relativ teuer sein werden. Gleichzeitig wird der Strombedarf gegenüber heute um 70 % steigen. Die Leistung von Solar- und Windkraftanlagen wird deutlich steigen, sodass am Ende etwa 300 GW

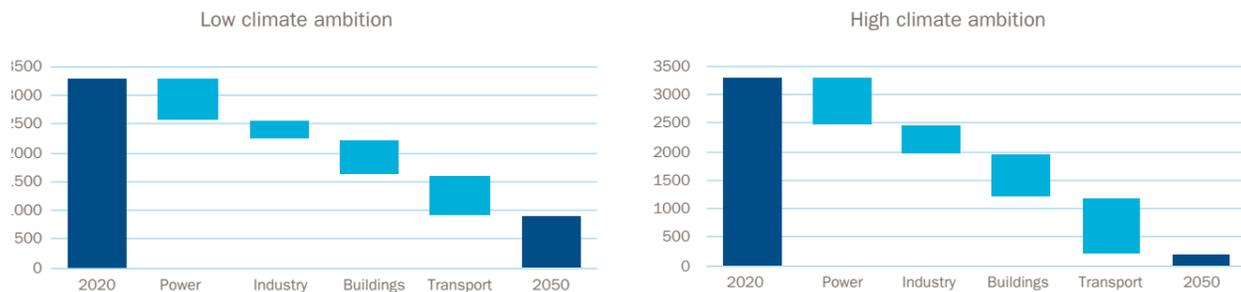
28 Wasserstoffanteil (%) an der Endenergie in Europa im Jahr 2050 bei unterschiedlichen Klimaschutzziele.



95 %
Strom aus erneuerbaren Energien in Europa im Jahr 2050 im Low Emissions Scenario

12 %
Wasserstoffanteil am Endenergiebedarf in Europa im Jahr 2050 im Low Emissions Scenario

29 Emissionssenkungen von 2020 bis 2050 im Fall von niedrigen Klimaschutzziele (links) und im Fall von hohen Klimaschutzziele (rechts) (durch den Energieverbrauch bedingte CO₂-Emissionen in Mio. t).



mehr an Solar- und Windenergie zur Verfügung stehen werden als im Low Emissions Scenario (Abbildung 27). Gegen Ende des Zeitraums wird emissionsfreier Wasserstoff ein integraler Bestandteil des Energiesystems sein und die Nachfrage wird deutlich höher sein als im Low Emissions Scenario angesetzt (Abbildung 28). Der Großteil des steigenden Wasserstoffbedarfs wird im Verkehrs- und Gebäudesektor anfallen.

Nach unseren Analysen werden die letzten Jahre der Energiewende bei einem verschleppten Umsetzung der Klimaschutzziele besonders herausfordernd sein, da die EU-Länder erst nach 2030 höhere Klimaschutzziele umsetzen können, um 2050 schließlich 95 % erreichen. In diesem Fall wird es auch mehr Kohle- und Gaskraftwerke im System geben, die am Ende als „stranded assets“ ungenutzt bleiben. (Dies sind bereits getätigte Investitionen in Unkenntnis späterer Maßnahmen seitens der Politik.) Da die langfristigen Klimaschutzziele nicht genau vorhersehbar sind, führen sie zu unklugen und verzögerten Investitionen der Marktteilnehmer und zu einer weniger kostenoptimalen Energiewende. Die Folge wird eine deutlich teurere Energiewende für ganz Europa sein. Unsere Analysen ergeben, dass die Kosten des Energiesystems im Vergleich zum Low Emissions Scenario über den gesamten Zeitraum um 4 % höher sein werden.* Das Ergebnis wird ein größeres Kapazitätswachstum bei der Kohle-, Gas-, Solar- und Windkraft sein als im Low Emissions Scenario (Abbildung 27). Bei verschlepptem Klimaschutz müssen die durch den Energieverbrauch verursachten CO₂-Emissionen um durchschnittlich 12 % pro Jahr gesenkt werden, verglichen mit 8 % im Low Emissions Scenario für den Zeitraum von 2030 bis 2050. Dies verdeutlicht, wie wichtig frühzeitiges Handeln und die Festlegung planbarer langfristiger Klimaschutzziele sind. Nur so kann sichergestellt werden, dass am Ende der wirtschaftlichste Weg zur Dekarbonisierung beschritten wird.

Insgesamt zeigen die Analysen Folgendes:

- Niedrige Klimaziele werden zu einer langsameren Energiewende führen, insbesondere außerhalb des Energiesektors.
- Hohe Klimaziele werden zur Nutzung von mehr erneuerbarer Energie und emissionsfreiem Wasserstoff führen.
- Eine verschleppte Umsetzung und nicht vorhersehbare Klimaschutzziele werden die Gesellschaft teuer zu stehen kommen.

Schnellere Emissionssenkungen durch höhere CO₂-Bepreisung

In diesem Jahrzehnt wurde auf der ganzen Welt mehr und mehr das Mittel der CO₂-Bepreisung eingeführt. Zweiundzwanzig Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen werden derzeit durch CO₂-Preise abgedeckt. Unsere Analysen zeigen, dass die Energiewende in Europa schneller gelingen wird, wenn höhere Klimaschutzziele mit einer CO₂-Bepreisung kombiniert werden.

Eine Bepreisung von CO₂ ist eines der wichtigsten Instrumente, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Allmählich führen immer mehr Länder und Regionen Emissionshandelssysteme oder CO₂-Steuern ein.⁴⁹ Durch die Festlegung eines Preises für Treibhausgasemissionen erhalten Unternehmen einen Anreiz, die effizientesten Lösungen zur Emissionssenkung zu finden. Heute werden 22 % der weltweiten Treibhausgasemissionen durch eine CO₂-Bepreisung abgedeckt. Der CO₂-Preis liegt zwischen 1 USD pro Tonne und 127 USD pro Tonne CO₂. Für den europäischen Energiesektor, den Industriesektor, die großtechnische Wärmeerzeugung und den innereuropäischen Flugverkehr wird der CO₂-Preis durch das EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) festgelegt. Im EU ETS werden die Emissionszertifikate nach einer Emissionsobergrenze festgelegt, die jedes Jahr herabgesetzt wird.⁵⁰ In Verbindung mit dem europäischen Grünen Deal erwägt die Europäische Kommission, den Anwendungsbereich des Systems auf zusätzliche Sektoren auszuweiten und den zu erreichenden Gesamtwert zu erhöhen.

Neben dem EU ETS haben mehrere europäische Länder auch für andere Sektoren CO₂-Preise eingeführt. Deutschland verfolgt ein nationales Klimaschutzziel von 55 % im Jahr 2030 und hat 2019 beschlossen, dass ab 2021 eine CO₂-Bepreisung für die Verkehrs- und Wärmesektoren eingeführt wird. Der CO₂-Preis wird schrittweise ab 25 Euro pro Tonne CO₂ steigen. Inzwischen hat Großbritannien beschlossen, das EU ETS zu verlassen und wird höchstwahrscheinlich im Zuge der Brexit-Verhandlungen ein separates nationales Emissionshandelssystem einführen. Dies soll jedoch später mit dem europäischen Emissionshandelssystem verknüpft werden können.

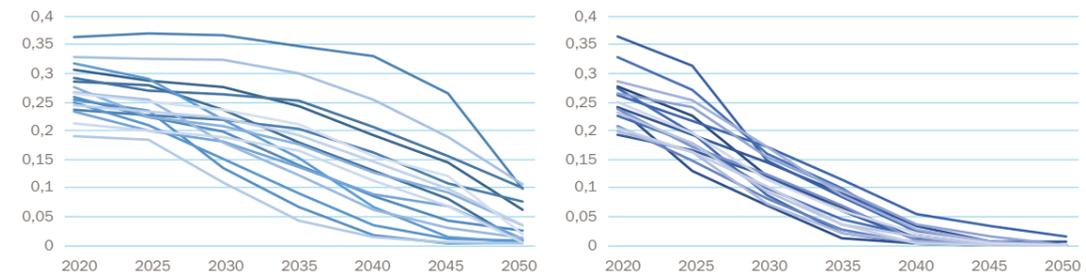
Um die Auswirkungen der CO₂-Bepreisung als politisches Instrument für die europäische Energiewende besser zu verstehen, haben wir die Wirkung

*Die Daten basieren auf dem europäischen Modell des Energiesystems. Änderungen der Kosten für Interkonnektoren zwischen Ländern sind berücksichtigt, aber Änderungen der Kosten für regionale, lokale Stromnetze und die Energieeffizienz sind nicht berücksichtigt.

**Annahmen der Analyse: Es wurden drei Möglichkeiten für eine explizite CO₂-Bepreisung zusätzlich zu den gemeinsamen EU-Klimaschutzziele analysiert: i) ein gemeinsamer CO₂-Preis für alle Länder und Sektoren, ii) ein höherer CO₂-Preis für EU ETS- als für Nicht-EU ETS-Sektoren, iii) ein höherer CO₂-Preis für einige „führende“ Länder als für den Rest der EU. Die Erkenntnisse aus diesen Möglichkeiten werden miteinander und mit dem Low Emissions Scenario verglichen. CO₂-Preise variieren von 0 bis 200 EUR/tCO₂. Eine vollständige Analyse der politischen Instrumente wurde nicht durchgeführt.

***„Effektive CO₂-Bepreisung“ ist als CO₂-Preis definiert, der den Marginalkosten der Emissionsminderung so weit entspricht, dass der CO₂-Preis einen tatsächlichen Effekt hat.

30 Wärmenutzung in der Industrie: Emissionen pro Energieverbrauch und Land (MtCO₂/TWh). (Unterschiedliche CO₂-Preise zwischen Ländern in der Grafik links und einheitliche CO₂-Preise zwischen Ländern in der Grafik rechts).



verschiedener CO₂-Preise über Sektoren und Regionen hinweg bis 2050 genauer untersucht.**

Unsere Analysen belegen, dass eine effektive CO₂-Bepreisung die Emissionssenkung in allen Sektoren beschleunigt.*** Dies liegt daran, dass die CO₂-Bepreisung ein direktes Signal für eine Verhaltensänderung innerhalb eines bestimmten Zeitraums darstellt. Deshalb wird die Energiewende in Europa schneller voranschreiten, wenn hohe Klimaschutzziele mit einer effektiven CO₂-Bepreisung kombiniert werden.

Die CO₂-Bepreisung im europäischen Emissionshandelsmarkt ist für einer größeren Chancengleichheit der beteiligten Marktteilnehmer länderübergreifend geregelt. Wir haben untersucht, was geschieht, wenn der CO₂-Preis zwischen Ländern und Regionen innerhalb von Sektoren variiert, die ein gemeinsames EU-Klimaschutzziel verfolgen. Die Analysen ergeben größere Unterschiede bei den Emissionen pro Energieverbrauch (tCO₂/TWh) innerhalb eines Sektors in Ländern mit unterschiedlichen CO₂-Preisen, und die Spanne wird im Laufe der Zeit größer.

Ein einheitlicher CO₂-Preis über alle Länder hinweg hat den gegenteiligen Effekt, und die Emissionen pro Energieverbrauch im Energie- und Industriesektor werden sich bis 2050 aneinander angleichen (Abbildung 30). Bei sonst gleichen Bedingungen könnten größere Abweichungen bei der CO₂-Bepreisung zu einer stärkeren Emissionsverlagerung von Gütern und Produkten, aber auch zu Verschiebungen beim Import und Export von Strom in der EU führen.

Marktteilnehmer in Ländern mit höheren CO₂-Preisen könnten einen Wettbewerbsnachteil gegenüber Marktteilnehmern mit einem niedrigeren CO₂-Preis haben.* Eine getrennte CO₂-Bepreisung sollte daher eine bewusste Entscheidung einiger Länder sein, eine größere Verantwortung für die Emissionsminderung in der EU zu übernehmen.

In einen perfekten Markt wäre ein gemeinsamer CO₂-Preis für alle Sektoren in Europa die beste sozioökonomische Alternative, da die günstigsten Emissionssenkungen innerhalb eines sehr großen Marktes zuerst umgesetzt würden. In diesem Fall würden für alle Treibhausgasemissionen die gleichen Kosten gelten und alle Marktteilnehmer hätten die gleichen Anreize. Daher lässt sich diese Regelung prinzipiell als unkompliziert, fair und übersichtlich beschreiben.

Leider sieht die Realität anders und nicht so geradlinig aus. Maßnahmen mit hohen Anfangsinvestitionskosten und langer Bauzeit, wie z. B. Infrastrukturprojekte,

müssen oft zeitgleich mit anderen Maßnahmen umgesetzt werden, um den gewünschten Klimaschutzeffekt zu erzielen. Eine weitere Herausforderung ist, dass die CO₂-Bepreisung hauptsächlich die Betriebskosten und die Lebenszykluskosten betrifft, aber in einigen Fällen werden die anfänglichen Kapitalkosten genauso wichtig für Investitionsentscheidungen sein. Dies ist normalerweise der Fall, wenn jemand z. B. ein neues Auto kaufen oder in eine neue Heizungsanlage bzw. Energieeffizienzmaßnahmen für sein Haus investieren möchte. Für viele Technologien im Anfangsstadium der Entwicklung, bevor sie kommerziell rentabel sind, könnten auch andere politische Instrumente benötigt werden. In solchen Fällen ist es unerlässlich, dass diese anderen politischen Instrumente die Effektivität des Instruments der CO₂-Bepreisung nicht abschwächen. Im EU ETS, in dem der Preis durch das Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage bestimmt wird, ist es wichtig, dass Zertifikate gelöscht werden, um jeglichen negativen Effekt auf den CO₂-Preis durch andere politische Instrumente zu verhindern.**

Zusammenfassend zeigen unsere Analysen, dass eine effiziente CO₂-Bepreisung zusammen mit höheren Klimaschutzziele die Emissionsminderung beschleunigen kann. Eine länderübergreifend vereinheitlichte CO₂-Bepreisung ist im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit zwischen den Ländern besser, da sich die Emissionen pro Energieverbrauch (unter sonst gleichen Bedingungen) im Laufe der Zeit innerhalb eines Sektors angleichen. Grundsätzlich wird ein gleicher CO₂-Preis für alle Sektoren eine kostengünstigere Energiewende begünstigen, aber dies würde perfekte Märkte voraussetzen. Eine mögliche Änderung des Aufbaus und die Erweiterung des EU ETS auf andere Sektoren muss gründlich geprüft werden, wobei die Wirksamkeit des CO₂-Preises, die Verteilungseffekte und die Verwaltungskosten zu berücksichtigen sind. In einigen Fällen, z. B. bei der Infrastrukturerschließung oder bei nicht ausgereiften Technologien, müssen zusätzlich zu einem Emissionshandelsmarkt andere politische Instrumente eingesetzt werden. In diesen Fällen sollten alle negativen Auswirkungen auf den CO₂-Preis, die durch andere politische Instrumente verursacht werden, abgefangen werden, damit der CO₂-Preis weiterhin wirksam bleibt.

22 %
Zweiundzwanzig Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen werden derzeit durch CO₂-Preise abgedeckt

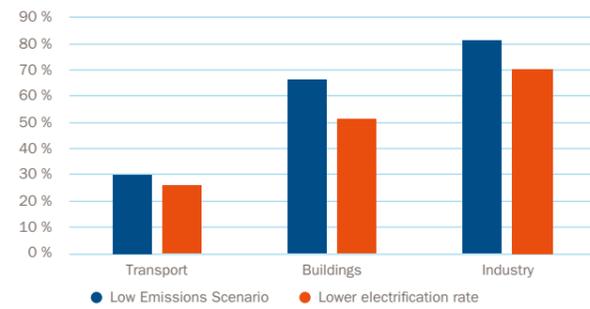
MEHR
Elektrowärmepumpen im Gebäude- und Industriesektor

*Als Carbon Leakage wird bezeichnet, wenn Emissionssenkungen in einem Land zu erhöhten Emissionen in einem anderen Land führen. Dies ist z. B. der Fall, wenn ein Industriezweig seine Produktion in ein Land verlagert, in dem die Freisetzung von Treibhausgasen preisgünstiger ist. Neben der CO₂-Bepreisung werden auch andere Faktoren wie die nationale Energie- und Industriepolitik sowie die lokalen Kosten und Ressourcen eine entscheidende Rolle spielen, wenn es um Carbon Leakage und Emissionen pro Energieverbrauch geht.

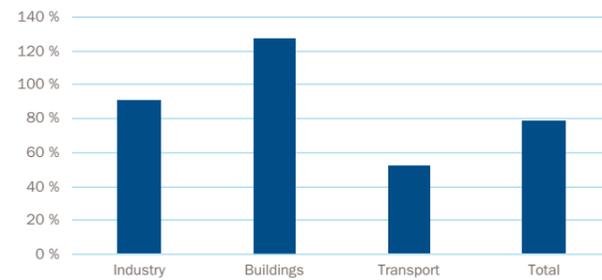
**Falls es zu Überschneidungen von politischen Maßnahmen in den Sektoren kommt, für die Emissionszertifikate erforderlich sind, sinkt die Nachfrage nach EUA-Zertifikaten und damit auch der CO₂-Preis. Zum Ausgleich des Emissionshandelsystems muss das Angebot daher entsprechend nach unten angepasst (d. h. Zertifikate gelöscht) werden, sodass sich die verschiedenen Politikinstrumente und das Emissionshandelssystem gegenseitig verstärken und der Effekt aufgehoben wird.

***Annahmen der Analyse: Der Wärmebedarf in Gebäuden unterliegt einer Begrenzung (in %), wie viel Energie (Endverbrauch) durch Elektrowärmepumpen und direktes Heizen mit Strom gedeckt werden kann. Das Gleiche gilt für den direkten Stromverbrauch in der Industrie und für Elektroautos.

31 Stromanteil pro Sektor im Jahr 2050 im Low Emissions Scenario verglichen mit dem Fall einer geringeren Elektrifizierung (%)

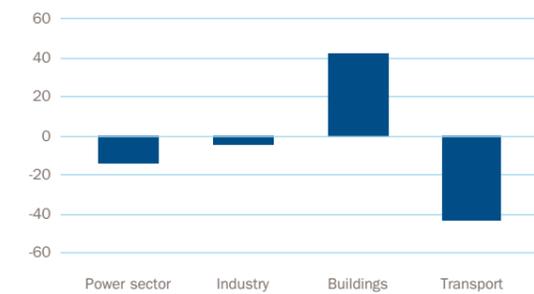


32 Prozentualer Anstieg der Wasserstoffnutzung im Fall einer geringeren Elektrifizierung verglichen mit dem Low Emissions Scenario (%)

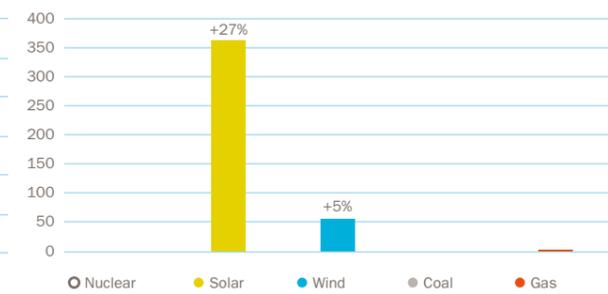


KOHLEKRAFTWERK in der Stadt Bełchatów, Polen

33 Änderungen der Emissionen pro Sektor im Jahr 2050 im Fall einer geringeren Elektrifizierung verglichen mit dem Low Emissions Scenario (Mt CO₂)



34 Änderungen der installierten Leistung (GW) im Fall einer geringeren Elektrifizierung verglichen mit dem Low Emissions Scenario



Vermehrter Einsatz von Wasserstoff durch Hürden für die Elektrifizierung in den Sektoren Gebäude, Industrie und Verkehr

Für die im Low Emissions Scenario angenommenen Elektrifizierungsmengen wird vorausgesetzt, dass die Ladeinfrastruktur und die Stromnetze schnell ausgebaut und geografisch gleichmäßig verteilt werden. Gleichzeitig wird eine schnelle Verbreitung von Elektrowärmepumpen im Gebäude- und Industriesektor angenommen. In diesem Abschnitt wird untersucht, welche Folgen es für die Energiewende in Europa hat, wenn eine dieser Voraussetzungen nicht wie erwartet erfüllt wird.

Im Low Emissions Scenario wird der Strombedarf in Europa bis 2050 um mehr als 60 % steigen. Der Stromanteil am Gesamtenergieverbrauch in den Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie wird 2050 bei 30 %, 66 % bzw. 81 % liegen. Obwohl unsere Analysen zeigen, dass dies der kostengünstigste Übergang zum Erreichen der Klimaschutzziele ist, bedeutet dies nicht, dass dieser Weg am Ende auch beschritten wird. Der im Low Emissions Scenario beschriebene Elektrifizierungsumfang bedeuten einen erheblichen Netzausbau in ganz Europa. In einigen Ländern, wie z. B. in Deutschland, gibt es einen erheblichen Widerstand gegen den Bau neuer Überlandleitungen von Nord- nach Süddeutschland, was die Entscheidungsfindung verlangsamt hat.⁵¹ Zusätzlich wird ein schneller und geografisch gleichmäßig verteilter Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie eine rasche Umstellung auf elektrische Wärmepumpen im Gebäude- und Industriesektor angenommen. Die Verwendung von elektrischen Wärmepumpen ist teilweise von den länderspezifischen Tarifen und Steuersystemen abhängig. In einigen Ländern kann es durch die Großhandelspreise für Strom für die Verbraucher teurer sein, zum Heizen Strom anstelle von fossilen Brennstoffen zu verwenden. Ergeben sich in einem oder mehreren dieser Bereiche Probleme, ist die direkte Nutzung von Strom davon betroffen. Daher haben wir genauer analysiert, wie Europa seine Klimaschutzziele noch erreichen kann, wenn es den unmittelbaren Einsatz von Strom in Gebäuden, im Verkehr und im Industriesektor einschränkt. Am Ende ergibt sich im Jahr 2050 ein Stromanteil von 26 % für den Verkehr, 51 % für Gebäude und 70 % für die Industrie, was deutlich niedriger ist als im Low Emissions Scenario (Abbildung 31).⁵²

Mehr erneuerbarer Energie durch langsameren Kohleausstieg in Europa

In Europa, ebenso wie in der restlichen Welt, stehen einige Länder einer schnellen Energiewende eher skeptisch gegenüber, da die Wirtschaft eng an die Industrie der fossilen Brennstoffe gekoppelt ist. In diesem Abschnitt wird dargelegt, dass Europa bei einem langsameren Kohleausstieg in einigen europäischen Ländern mehr Elektrifizierungsmaßnahmen und mehr Strom aus erneuerbaren Energien benötigt, um die Klimaschutzziele zu erreichen.

In der Analyse wird angenommen, dass mehreren europäischen Ländern ein langsamerer Kohleausstieg gewährt wird, während die EU die gleichen Klimaschutzziele wie im Low Emissions Scenario mit einer Emissionssenkung von 90 % bis 2050 erreichen wird.⁵³ Ein langsamerer Kohleausstieg im Stromsektor würde umfangreichere Emissionssenkungen in anderen Sektoren bedeuten. Dies würde zu einem höheren Einsatz von Strom in den Bereichen Gebäude, Industrie und Verkehr führen.

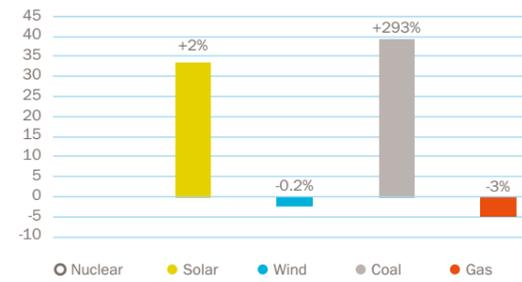
Eine höhere Elektrifizierungsrate wird den Strombedarf im Vergleich zum Low Emissions Scenario in die Höhe treiben. Das bedeutet, dass sowohl die Kapazität für Kohlestrom als auch für Strom aus erneuerbaren Energien ausgebaut wird, auch wenn dies zunächst widersprüchlich erscheinen mag (Abbildung 35). Bei Annäherung an das Jahr 2050 wird es dann unumgänglich sein, den Kohleverbrauch zu reduzieren, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Dann werden Kohlekraftwerke zurückbleiben, die schließlich als „stranded assets“ ungenutzt bleiben.

In dieser Analyse wird dargestellt, dass ein langsamerer Kohleausstieg eine schnellere Umstellung des Verkehrs und der Wärme in Gebäuden und Industrie erfordert. In einigen europäischen Ländern könnte ein aufgeschobener Ausstieg der Kohleindustrie die Last verlagern und die Energiewende in der Automobilindustrie und dem Gebäudesektor in anderen Ländern beschleunigen.

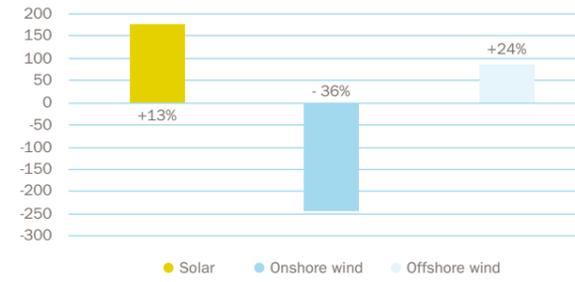
⁵¹Grüner Wasserstoff macht in den Analysen von Statkraft über 70 % der Wasserstoffproduktion im Jahr 2050 aus, wobei ein Großteil des Wasserstoffs in Bedarfsnähe erzeugt wird, wodurch weniger Infrastruktur benötigt wird. Gerade in der Übergangsphase wird es auch einen Bedarf an blauem Wasserstoff geben.

⁵²Annahmen der Analyse: Ein verlängerter Betrieb von Kohlekraftwerken wird über den Betrachtungszeitraum in Polen, Deutschland, der Tschechischen Republik, der Slowakei, Ungarn, Rumänien, dem Balkan, Spanien und Portugal angenommen. Bei bestehenden Kohlekraftwerken wird von einer längeren Laufzeit ausgegangen, und der Kohleausstieg pro Jahr und Land ist nur bedingt möglich.

35 Änderungen der Kapazität im Stromsektor (GW) infolge eines verlangsamten Kohleausstiegs. Prozentuale Veränderung gegenüber dem Low Emissions Szenario.



36 Änderungen der Leistung (GW) aus erneuerbaren Energien im Stromsektor durch begrenzteres Wachstum der Onshore-Windenergie (prozentuale Veränderung gegenüber dem Low Emissions Szenario)



Hürden beim Ausbau der Onshore-Windkraft: andere Lösungen für die Energiewende

Wenn der Ausbau der Onshore-Windkraftanlagen auf Hindernisse stößt und das Klimaschutzziel der EU bestehen bleibt, werden nach unseren Analysen mehr Solaranlagen und Offshore-Windparks gebaut werden. Dies wird wiederum zwei entscheidende Folgen haben: Die Energiewende wird teurer werden, und die Kapazitäten der länderübergreifenden Interkonnektoren in der EU werden zunehmen.

In den meisten Ländern wird die Bevölkerung eine klare Haltung zu den Energiekosten, dem Infrastrukturausbau und den Umweltauswirkungen haben. Daher wird es in einem Großteil der Länder einen gewissen Widerstand gegen die Energiewende geben. Forschungsergebnissen zufolge wird sich der Widerstand gegen die Klimapolitik verstärken, wenn diese unklar ist, wenn sie als sozial ungerecht empfunden wird oder wenn sie Folgen für bedrohte Lebensräume haben wird. Ebenso wächst der Widerstand, wenn Klimamaßnahmen die finanzielle Lage der Betroffenen erheblich beeinträchtigen.⁵² In den letzten Jahren gab es in mehreren Ländern Massendemonstrationen gegen höhere Mineralölsteuern und Mautgebühren, aber auch gegen neue Windkraftprojekte.

Im Low Emissions Szenario wird die Energie aus Onshore-Windkraft im Jahr 2050 etwa ein Viertel der gesamten installierten Leistung in Europa ausmachen. Dies entspricht einem kostenoptimalen Dekarbonisierungspfad für ganz Europa. Wenn der Widerstand gegen die Onshore-Windkraftanlagen in mehreren Ländern wächst, während die Klimaschutzziele der EU insgesamt bestehen bleiben, wird Europa andere Lösungen zum Klimaschutz brauchen. Anhand der Analysen haben wir untersucht, welche Folgen eine Begrenzung des Ausbaus von Onshore-Windkraftanlagen hätte, solange die EU die gleichen Klimaschutzziele verfolgt und gleichzeitig eine möglichst wirtschaftliche Energiewende anstrebt.*

Unsere Analysen zeigen, dass eine Energiewende, bei der die Leistung der Onshore-Windkraftanlagen auf ein Drittel der Leistung im Low Emissions Szenario im Jahr 2050 begrenzt ist, zu einem weiteren Ausbau anderer erneuerbarer Energiequellen führen wird. Sowohl die Photovoltaik als auch die Offshore-Windkraft werden die wegfallende Energieerzeugung aus der Onshore-Windkraftanlagen ausgleichen. Der Strombedarf wird unverändert bleiben und es wird eine gewisse Menge

an zusätzlichem Strom aus Gas im Strommix erforderlich sein. Außerdem wird die Batteriekapazität steigen, um den höheren Bedarf an Flexibilität im Energiesystem zu decken, der durch den höheren Anteil an Solarenergie entsteht.

Unsere Analysen ergeben auch höhere Treibhausgasemissionen bis 2030 und einen etwas höheren Bedarf an emissionsfreiem Wasserstoff in den anderen Sektoren bis 2050. Auch der Bedarf an physischen Interkonnektoren zwischen den Energiesystemen wird sich verändern. Physisch vernetzte Strommärkte können von den Unterschieden in den Energiesystemen profitieren und den Zugang zu flexiblen Lösungen erleichtern. Der höhere Anteil an schwankender Solar- und Windenergie in den europäischen Stromnetzen erfordert länderübergreifende Interkonnektoren, um Flexibilität und Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Im Low Emissions Szenario wird die Interkonnektorkapazität in Europa bis 2050 um 30 % steigen. Bei einem Strommix, bei dem der Ausbau der Onshore-Windenergie begrenzt ist und durch mehr Solaranlagen und Offshore-Windparks ersetzt wird, wird der Bedarf an Interkonnektorkapazitäten im Zeitraum durchschnittlich 5 % höher sein.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Hürden beim Ausbau der Onshore-Windenergie zu einem stärkeren Ausbau in den Bereichen der Photovoltaik und Offshore-Windenergie führen werden. Außerdem werden die Kosten für den Übergang steigen, und länderübergreifende Interkonnektoren werden immer wichtiger werden. Höhere Kosten und länderübergreifende Interkonnektoren können wiederum zu neuem Widerstand führen.

*Annahmen der Analyse: Für einige europäische Länder wird ein eingeschränkter Ausbau der Onshore-Windenergie angenommen. Dies wird die installierte Leistung (GW) der Onshore-Windkraftanlagen in Frankreich, Deutschland, Großbritannien, Griechenland, Spanien, Portugal, Italien, den Niederlanden und Polen verringern.



BAILLE-WINDPARK in den schottischen Highlands

Zusammenfassung: Auf dem Weg zu einer sozial gerechten und wirtschaftlichen Energiewende

Das Ergebnis im Low Emissions Scenario ist ein Energiesystem, das niedrigere Pro-Kopf-Kosten als heute aufweist. Bei der Energiewende gibt es jedoch einige Herausforderungen. Eine wichtige Voraussetzung für das Erreichen der Klimaschutzziele ist eine hinreichende öffentliche Unterstützung. Zudem können unvorhergesehene Ereignisse, wie z. B. die Coronapandemie, Auswirkungen auf den Fortschritt der Energiewende haben. Die Pandemie kann zu langfristigen Verhaltensänderungen führen, wodurch die Menschen weniger reisen und konsumieren. Dies wiederum könnte die Energiewende stärker beschleunigen, als im Low Emissions Scenario angenommen. Das Ergebnis kann auch das Gegenteil sein, mit weniger internationaler Zusammenarbeit und einer weltweit langsameren Energiewende. Sobald die Welt beginnt, sich von der Coronapandemie zu erholen, sind planbare politische Ziele und zukunftsweisende Investitionen für eine schnelle und wirtschaftliche Energiewende erforderlich.

Eine der größten Herausforderungen für die Energiewende ist es, Nutzen und Kosten für die Gesellschaft gerecht zu verteilen. Das Resultat im Low Emissions Scenario ist ein Energiesystem, das niedrigere Kosten pro Kopf und pro BIP als heute aufweist. Dennoch bringt die Energiewende einige Herausforderungen mit sich. Während einige Länder, Bevölkerungsgruppen und Einzelpersonen möglicherweise von der Energiewende profitieren, werden andere benachteiligt. Eine faire Verteilung von Kosten und Nutzen wird dabei entscheidend sein. Eine hinreichende Unterstützung durch die Öffentlichkeit ist eine Voraussetzung für die schnelle Energiewende, die zum Erreichen der Klimaschutzziele unerlässlich ist.

Außerdem wird es darauf ankommen, einen guten, vorhersehbaren Rahmen für den Übergang zu schaffen. Unsere Analysen zeigen, dass ehrgeizige, vorhersehbare Klimaschutzziele zusammen mit Märkten und einer effektiven CO₂-Bepreisung die Energiewende beschleunigen und Emissionen schneller senken können als Klimaschutzziele allein. Es ist dringend notwendig, mehr Strom aus erneuerbaren Energien zu erzeugen und die Bereiche Verkehr, Gebäude und Industrie durch Elektrifizierung zu dekarbonisieren. Diese Lösungen für den Klimaschutz können fossile Alternativen in kurzer Zeit verdrängen. In Anwendungsbereichen, in denen die direkte Elektrifizierung an ihre Grenzen stößt, werden andere Lösungen erforderlich sein. Emissionsfreier Wasserstoff und Ammoniak können in diesen schwerer zu beeinflussenden Anwendungsbereichen eine wichtige Rolle spielen. Um die Dekarbonisierung in diesen Bereichen zu beschleunigen, bedarf es einer stärkeren politischen Unterstützung. Die Welt kann viel von Europas neuer Wachstumsstrategie, dem europäischen Grünen Deal, lernen. Es handelt sich um eine ganzheitliche Strategie. Ziel ist es, die Märkte zu stärken und die europäische Industrie zu modernisieren, wobei der Schwerpunkt auf einer gerechten Energiewende liegt.

Die Coronapandemie könnte zu großen strukturellen Veränderungen in der Gesellschaft führen, die sich auf die weltweiten

Energiemärkte auswirken. Die Lockdown-Maßnahmen haben dazu geführt, dass immer weniger gereist wird, verstärkt digitale Lösungen eingesetzt werden und der Konsum stark zurückgegangen ist. Sollten die Maßnahmen bleibende Veränderungen zur Folge haben, nachdem die Beschränkungen aufgehoben wurden und die Pandemie vorbei ist, können die langfristigen Auswirkungen auf die Energiesysteme größer sein als im Low Emissions Scenario angenommen. Dauerhafte Umstellungen in den Alltagsgewohnheiten, in den Verhaltensmustern und im Güter- und Personenverkehr könnten die Energiewende beschleunigen. Solche dauerhaften Veränderungen können durch „grüne“ Konjunkturpakete weiter verstärkt werden. Dies wiederum könnte zu mehr Akzeptanz in der Klimapolitik führen. Andererseits besteht die Gefahr, dass die Pandemie in der Bevölkerung Ängste hervorruft, die zu verstärktem Protektionismus und mehr politischen Spannungen in der Welt führen könnten. Zudem besteht das Risiko, dass die bestehenden globalen Institutionen geschwächt werden. Diese Aspekte spielen bei der Lösung der Klimakrise eine ausschlaggebende Rolle. Eine globale Dekarbonisierung, die dem Low Emissions Scenario von Statkraft entspricht oder dieses übertrifft, erfordert eine globale Handels- und Klimapolitik, die die Energiewende fördert und nicht erschwert.

Bei bestimmten Schwierigkeiten mit spezifischen Dekarbonisierungslösungen, wie z. B. beim Ausbau der erneuerbaren Energie-Kapazitäten für erneuerbare Energien, einem langsameren Kohleausstieg oder einer begrenzteren Elektrifizierung, ergeben unsere Analysen, dass es zwar Alternativlösungen gibt, diese die Energiewende aber in der Regel teurer machen werden. Treten in einem Sektor Probleme auf, hat dies entweder zur Folge, dass die Klimaschutzziele nicht erreicht werden oder dass andere Sektoren einen größeren Anteil der Emissionssenkung übernehmen müssen. Ähnliches gilt, wenn die langfristigen Klimaschutzziele nicht kalkulierbar sind. Dann besteht das Risiko von Fehlinvestitionen und einer kostenintensiveren Energiewende. Jetzt, wo sich die Welt von der Coronapandemie erholen sollte, sind verlässliche Ziele, kostengünstige Lösungen und zukunftsorientierte Investitionen gefragt.

Auch wenn es bei der Energiewende verschiedene Hürden zu überwinden gilt, so belegen unsere Analysen, dass es einen großen Bedarf an mehr Strom aus erneuerbaren Energien und emissionsfreiem Wasserstoff geben wird, sofern Europa seine Klimaschutzziele erreichen will. Für die Dekarbonisierung des Energiesektors und die Umstellung von fossilen Brennstoffen auf Strom im Verkehrs-, Industrie- und Gebäudesektor wird wesentlich mehr erneuerbare Energie benötigt. Die Entwicklungen im Stromsektor haben in den vergangenen zehn Jahren erstaunlich schnell Fortschritte gemacht. Besonders in den Bereichen Photovoltaik, Windkraft, Elektrolyseure und Batterien konnten enorme Kostensenkungen und Wachstumsraten verzeichnet werden. Dies zeigt, dass ein schneller Umstieg möglich ist, wenn sich Politik, Märkte und Technologie in dieselbe Richtung bewegen.



ANHANG: Wichtige Parameter und Annahmen

Tabelle 1. Wichtige Parameter im Low Emissions Scenario von Statkraft im Vergleich zu IEA, IRENA und DNV GL*

Sektoren	Low Emissions Scenario von Statkraft für das Jahr 2019	IEA STEPS (2019) (bis 2040)	IRENA REmap (2020)	IEA SDS (2019) (bis 2040)	DNV GL ETO (2019)
Durchschnittlicher jährlicher Anstieg des Primärenergiebedarfs 2018-2050	0,3 %	0,98 % (bis 2040)	-0,20%	0,30% (bis 2040)	-0,09%
Stromsektor (durchschnittlicher jährlicher Anstieg 2018-2050)					
Bedarf	2,5%	2,03 % (bis 2040)	2,35%	1,70% (bis 2040)	2,43 %
Windenergie	8,5%	6,66% (bis 2040)	8,95%	8,90% (bis 2040)	8,84%
Solarenergie	12,5%	9,88% (bis 2040)	10,98%	12,0% (bis 2040)	11,91 %
Wasserkraft	1,6%	1,71 % (bis 2040)	1,87%	2,30% (bis 2040)	1,87%
Anteil fossiler Brennstoffe im Energiesektor (TWh, 2050)	12,0%	48,0 % (bis 2040)	14,1 %	21,0%	18,0%
Primärenergie					
Ölverbrauch: Jährlicher Anstieg 2018-2050	-1,7%	0,41 % (bis 2040)	k. A.	-1,8% (bis 2040)	-1,83%
Gasverbrauch: Jährlicher Anstieg 2018-2050	0,4%	1,40% (bis 2040)	k. A.	-0,2% (bis 2040)	0,42%
Kohleverbrauch: Jährlicher Anstieg 2018-2050	-3,2%	-0,05% (bis 2040)	k. A.	-4,3 % (bis 2040)	-3,21 %
Globale durch den Energieverbrauch verursachte CO ₂ -Emissionen (GtCO ₂) im Jahr 2050	18,0	35,6 (2040)	9,8	15,8 (2040)	20,8

*Die Szenarien beruhen auf unterschiedlichen Annahmen und sind daher nicht direkt vergleichbar. Sowohl das IEA STEPS- als auch das DNV ETO-Szenario sind Bezugsszenarien. Das Low Emissions Scenario von Statkraft ist ein technologisch optimistisches und realistisches Szenario. Die Szenarien von IRENA REmap und IEA SDS beruhen auf einem wünschenswerten Klimaschutzziel und analysieren, wie dieses erreicht werden kann.

Annahmen im Low Emissions Scenario von Statkraft

Im Low Emissions Scenario von Statkraft werden die aktuellen globalen Energietrends weitergeführt und eine realistische, optimistische Sicht auf die Energiewende bis zum Jahr 2050 aufgezeigt.

Grundlagen für das Szenario sind die Weiterentwicklung bekannter Technologien und eigene globale und regionale Analysen von Statkraft. Das Szenario basiert weder auf einer linearen Projektion aktueller Trends, noch wird darin von einem bestimmten Klimaschutzziel ausgegangen und von diesem eine Rückwärtsanalyse durchgeführt. In den Analysen wird von denselben Trends ausgegangen wie bei allen anderen Statkraft-Analysen.

Im Low Emissions Scenario wird die Kostenentwicklung für bekannte Technologien bis zum Jahr 2050 analysiert, darunter Anlagen zur regenerativen Stromerzeugung, Batterien, emissionsfreier Wasserstoff usw. Dabei wird von einem weiteren rapiden Rückgang der Kosten pro MWh und einem hohen Ausbautempo bis etwa 2030 ausgegangen. Danach verläuft der Kostenrückgang etwas langsamer, zunächst für Wind- und dann für Solarenergie. Dies entspricht einer realistischen, aber dennoch optimistischen Annahme.

Im Low Emissions Scenario wird eine stärkere Ausrichtung auf regionale Wertschöpfungsketten unterstellt. Die Energiewende wird jedoch weiterhin durch eine starke globale Abhängigkeit und den weltweiten Handel mit Waren und Dienstleistungen erleichtert. Das Low Emissions Scenario von Statkraft geht davon aus, dass die globale Handels- und Klimapolitik die Energiewende unterstützen wird.

Die Analysen basieren auf internen Modellen und fundierten Studien externer Quellen.

Das Low Emissions Scenario von Statkraft wurde von dem Statkraft-Team für strategische Analysen in Zusammenarbeit mit Experten aus anderen Bereichen erstellt. Über 50 Analysten arbeiten bei Statkraft im Bereich der Marktanalyse.

Im Szenario werden ein globales Energiebilanzmodell und ein europäisches Modell für ein Energieversorgungssystem mit detaillierten Strommarktmodellen in den Ländern, in denen Statkraft tätig ist, kombiniert. Statkraft simuliert die Entwicklung der Strommärkte für die skandinavischen Länder, Europa, Indien und Länder in Südamerika bis zum Jahr 2050 im Detail – stundengenau. Das europäische Modell des Energieversorgungssystems setzt voraus, dass die wirtschaftlichsten Lösungen für Europa gewählt werden. Die Kostenoptimierung wird regions- und branchenübergreifend angewendet.

Die Analysen für Europa wurden von Statkraft in Zusammenarbeit mit T. Burandt, K. Hainsch und K. Löffler (Technische Universität Berlin) durchgeführt, basierend auf einer angepassten Version von GENE SYS-MOD (Designing a Model for the Global Energy System - GENE SYS- MOD: An Application of the Open-Source Energy Modeling System (OSEMOSYS)) von Konstantin Löffler, Karlo Hainsch, Thorsten Burandt, Pao-Yu Oei, Claudia Kemfert und Christian Von Hirschhausen (2017).

Für die durch den Energieverbrauch bedingten CO₂-Emissionen wurden die Analysen in Zusammenarbeit mit Glen Peters, Forschungsleiter, CICERO, durchgeführt, und die Klimaszenarien sind dem IAMC 1.5°C Scenario Explorer von IIASA (Version 1.1) entnommen (<https://data.ene.iiasa.ac.at/iamc-1.5c-explorer/>), analysiert in Rogelj, Shindell, et al, „Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development“, in „Special Report on Global Warming of 1.5°C (SR15)“, Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, Genf, 2018 (<http://www.ipcc.ch/sr15/>), Statkraft-Analysen und IEA World Energy Outlook 2019.

Coronapandemie und Annahmen zum globalen Energiebedarf

Ausgangspunkt der Analysen ist das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum im Einklang mit einem marktwirtschaftlichen Konsens. Die globalen Parameter sind entsprechend dem IEA World Energy Outlook 2019 anhand historischer Daten kalkuliert.

Im Low Emissions Scenario wird angenommen, dass die Weltwirtschaft rückläufig ist und nach der Pandemie wieder von einem niedrigeren Niveau aus zulegt. Die Konjunktur wird sich zwar erholen, aber die Weltwirtschaft und der Energiebedarf werden über den gesamten Zeitraum niedriger bleiben als vor der Pandemie erwartet. Die Folgen der Pandemie werden bis 2050 allmählich verschwinden. Es wird nicht davon ausgegangen, dass die Maßnahmen zur Eindämmung der Coronapandemie zu bedeutenden dauerhaften Verhaltensänderungen führen werden, wenn die Beschränkungen aufgehoben wurden und die Pandemie vorüber ist. Strukturelle Veränderungen können jedoch weltweit größere und nachhaltigere Auswirkungen auf die Energieversorgungssysteme haben als im Niedrigemissionsszenario zugrunde gelegt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt besteht eine große Ungewissheit über die Zukunft, und die Geschwindigkeit der Energiewende könnte sich durch die ständigen Änderungen nach der Coronakrise entweder beschleunigen oder verlangsamen.

- 1 Weltwirtschaftsforum (2020). *The Global Risk Report 2020*: <https://www.weforum.org/reports/the-global-risks-report-2020>
- 2 Schiefloe, Per M. (2020). *Covid-19 – et «wicked problem»*: <https://www.universitetsavisa.no/incoming/2020/04/16/%E2%80%8BCovid-19-%E2%80%93-et-%C2%ABwicked-problem%C2%BB-21591594.ece>
- 3 IMF (2020). *World Economic Outlook Update*, Juni 2020: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2020/06/24/WEOUpdateJune2020>
- World Bank (2020). *Global Economic Prospects*: <https://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects>
- 4 IPCC (2019). *Climate Change and Land*: <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- IPCC (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*: <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- 5 World Meteorological Organization (2020). *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019*: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10211
- 6 Bjerknes Center for Climate Research (2020): <https://www.bjerknes.uib.no/index.php/>
- 7 World Meteorological Organisation (2020). *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019*: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10211
- 8 Center for Climate and Energy Solutions (2020). *Global emissions*: <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>
- IPCC (2014). *Fifth Assessment Report*: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>
- 9 Global Carbon Project (2019). *Global Carbon Budget*: <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/19/highlights.htm>
- IEA (2020), *Global Energy Review 2020*: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>
- 10 Quéré, C. et al. (2020). *Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement*: <https://www.nature.com/articles/s41558-020-0797-x>
- 11 World Health Organisation (2018). *Air pollution*: <https://www.who.int/news-room/air-pollution>
- 12 IRENA (2020). *Globaler Ausblick erneuerbare Energien: Ausgabe: 2020*: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_GRO_2020_findings_DE.pdf?la=en&hash=513F1AF000BF702F8AE61C566501B3DC68208BEA
- 13 IEA (2020). *Global energy-related CO₂ emissions, 1900-2020*: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-1900-2020>
- 14 UNFCCC (2020). *The Paris Agreement*: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- 15 Europäische Kommission (2019). *Ein europäischer Grüner Deal*: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
- 16 Eurostat (2020). *Preliminary flash estimate for the second quarter of 2020*: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/11156775/2-31072020-BP-EN.pdf/cbe7522c-ebfa-ef08-be60-b1c9d1bd385b>
- 17 Europäischer Rat (2020). *Ein Aufbauplan für Europa*: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/eu-recovery-plan/>
- 18 Frankfurt School-UNEP Centre/Bloomberg New Energy Finance (2020). *Global trends in renewable energy investment 2020*: https://www.fs-uneep-centre.org/wp-content/uploads/2020/06/GTR_2020.pdf
- 19 Ibid
- 20 IEA (2020). *World Energy Investment 2020*: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020>
- 21 Frankfurt School-UNEP Centre/Bloomberg New Energy Finance (2020). *Global trends in renewable energy investment 2020*: https://www.fs-uneep-centre.org/wp-content/uploads/2020/06/GTR_2020.pdf
- 22 IEA (2020). *World Energy Investment 2020*: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020>
- 23 IRENA (2020). *Globaler Ausblick erneuerbare Energien: Ausgabe: 2020*: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_GRO_2020_findings_DE.pdf?la=en&hash=513F1AF000BF702F8AE61C566501B3DC68208BEA
- 24 IEA (2020). *Global Energy Review 2020*: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>
- 25 Ember (2020). *Renewables beat fossil fuels*: <https://ember-climate.org/project/renewables-beat-fossil-fuels/>

Die Zahlen in der Analyse von Ember stammen aus ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity)

- 26 BNEF (2020). *Covid-19 Indicators: Sustainability*: <https://www.bnef.com/core/insights/23863?query=eyJxdWVyeSI6ImNvdmlkIDE5IGluZGJlYXJvcnMiLCJwYWdlIjoxLCJvcmlkI6InJlbGV2YW5jZS9>
- 27 Blackrock (2020). *A Fundamental Reshaping of Finance*: <https://www.blackrock.com/corporate/investor-relations/larry-fink-ceo-letter>
- 28 Europäische Kommission (2018). *Frequently asked questions about EU taxonomy & EU green bond standard*: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/200610-sustainable-finance-teg-taxonomy-green-bond-standard-faq_en.pdf
- Europäischer Rat (2019). *Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates*: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-14970-2019-ADD-1/de/pdf>
- 29 Weltwirtschaftsforum (2019, 2020). *The countries most ready for the global energy transition*: <https://www.weforum.org/agenda/2019/03/the-countries-most-ready-for-the-global-energy-transition/>
- Fostering Effective Energy Transition 2020 edition*: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2020_Edition.pdf
- 30 The Institute for Energy Research (2020). *Germany and France Ramp Up Electric Vehicle Incentives*: <https://www.instituteforenergyresearch.org/international-issues/germany-and-france-ramp-up-electric-vehicle-incentives/>
- 31 Energypolicytracker (5. August 2020). *Track public money for energy in recovery packages*: <https://www.energypolicytracker.org/>
- 32 BNEF (2020). *BNEF Executive Factbook*: <https://www.bnef.com/insights/22911/view>
- 33 Cockburn, H. (2020). *Britain goes coal-free for two months – longest period since industrial revolution*: <https://www.independent.co.uk/environment/britain-coal-free-industrial-revolution-renewable-energy-climate-change-a9556011.html>
- 34 Shearer, C. et al. (2020). *Boom and Bust 2020: Tracking The Global Coal Plant Pipeline*: https://endcoal.org/wp-content/uploads/2020/03/BoomAndBust_2020_English.pdf
- Ember (2020). *Renewables beat fossil fuels*: <https://ember-climate.org/project/renewables-beat-fossil-fuels/>
- 35 Weitere Details zu Flexibilität und Lösungen finden Sie im *Niedrigemissionsbericht 2018* von Statkraft: <https://www.statkraft.no/globalassets/explained/statkrafts-lavutslippsscenario-rapport-2018-v3.pdf/>
- 36 Europäische Kommission (2018). *EU coal regions: opportunities and challenges ahead*: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/eu-coal-regions-opportunities-and-challenges-ahead>
- Morris, A. C. et al. (2019). *The risk of fiscal collapse in coal-reliant communities*: https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2019/05/Morris_Kaufman_Doshi_RiskoffiscalCollapseinCoalReliantCommunities-CGEP_Report_FINAL.pdf
- 37 Shearer, C. et al. (2020). *Boom and Bust 2020: Tracking The Global Coal Plant Pipeline*: https://endcoal.org/wp-content/uploads/2020/03/BoomAndBust_2020_English.pdf
- CarbonBrief (2020). *Analysis: Will China build hundreds of new coal plants in the 2020s?*: <https://www.carbonbrief.org/analysis-will-china-build-hundreds-of-new-coal-plants-in-the-2020s>
- 38 Kong, B. et al. (2019). *Globalization as Domestic Adjustment: Chinese Development Finance and the Globalization of China's Coal Industry*: <https://www.bu.edu/gdp/files/2019/04/GCI-GDPWP6-Globalization-as-Domestic-Adjustment-Kong-Gallagher.pdf>
- 39 OECD (2019). *Low and zero emissions in the steel and cement industries*: https://www.oecd.org/greengrowth/GGSD2019_IssuePaper_CementSteel.pdf
- 40 Europäische Kommission (2020). *Eine neue Industriestrategie für Europa*: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-eu-industrial-strategy-march-2020_de.pdf
- 41 Europäische Kommission (2018). *In-depth analysis in support of the commission communication com(2018) 773*: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf
- 42 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020). *Die Nationale Wasserstoffstrategie*: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>
- Europäische Kommission (2018). *Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa*: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/FS_20_1296
- Ministry of Petroleum and Energy and Ministry of Climate and Environment (2020). *The Norwegian hydrogen strategy*: <https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/the-norwegian-governments-hydrogen-strategy/id2704860/>
- 43 Berman, B. (2020). *Volvo CEO: Pandemic will rapidly accelerate shift to electric cars*: <https://electrek.co/2020/05/14/volvo-ceo-pandemic-will-rapidly-accelerate-shift-to-electric-cars/>
- Miller, J. (2020). *Europe eclipses China in electric vehicle investment*: <https://www.ft.com/content/aeb8f9a1-68ba-4281-b1f4-107b2f5ed129>

- 46 Die Grafiken wurden von Glen Peters, Forschungsleiter, CICERO, erstellt und stammen aus *IAMC 1.5 °C Scenario Explorer* präsentiert von IIASA (Version 1.1) (<https://data.ene.iiasa.ac.at/iamc-1.5c-explorer/>), analysiert in Rogelj, Shindell, et al, „Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development“, in „*Special Report on Global Warming of 1.5 °C (SR15)*“, Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, Genf, 2018 (<http://www.ipcc.ch/sr15/>).
Weitere Quellen: Statkraft-Analysen, IEA WEO19.
- 47 Das Modell des Energieversorgungssystems für Europa basiert auf einer angepassten Version des von der Technischen Universität Berlin entwickelten GENeSYS-Mod „(Designing a Model for the Global Energy System — GENeSYS-MOD: An Application of the Open-Source Energy Modeling System (OSeMOSYS))“ von Konstantin Löffler, Karlo Hainsch, Thorsen Burandt, Pao-Yu Oei, Claudia Kemfert und Christian Von Hirschhausen (2017).
- 48 Europäische Kommission (2018). *Langfristige Strategie – Zeithorizont 2050* https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_de

den Elzen, M. et al. (2018). *Global and Regional Greenhouse Gas Emissions Neutrality*: <http://www.pbl.nl/en/publications/global-and-regional-greenhouse-gas-emissions-neutrality>

Europäische Kommission (2020). *Global Energy and Climate Outlook 2019*: <https://ec.europa.eu/jrc/en/geco>
- 49 World Bank (2020). *Carbon Pricing Dashboard*: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>
- 50 Europäische Kommission (2018). *Emissionshandelssystem (EU-EHS)*: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_de
- 51 Olterman, P (2014). *North-south divide threatens Germany's renewable energy highway*: <https://www.theguardian.com/world/2014/feb/07/north-south-divide-threatens-germany-renewable-energy>

BNEF (2020). *Dong Says German Grid Delay Risks Confidence in Offshore Wind*: <https://www.bnef.com/core/news/519235>
- 52 Gregersen, T. et al. (2019). *What do people think of onshore and offshore wind power?:* <https://energiogklima.no/nyhet/vindkraft-pa-land-og-til-havs-nordmenns-holdninger/>

CICERO (2019). *People and the climate: Nordmenns holdninger til klimaendringer, klimapolitikk og eget ansvar*: <https://pub.cicero.oslo.no/cicero-xmliuj/bitstream/handle/11250/2634149/Rapport%202019%2020%20HQweb.pdf?sequence=6&isAllowed=y/>

Rønningsbakk, I. E. (2019). *CICERO-Forsker geben Empfehlungen für die norwegische Windkraftentwicklung*: <https://www.cicero.oslo.no/no/posts/nyheter/cicero-forskere-gir-raad-om-norsk-vindkraftbygging>