

The Making Mission Possible Series

Der Weg zur nachhaltigen Elektrifizierung:

30 Jahre für die Elektrifizierung der Weltwirtschaft

April 2021

Version 1.1

Zusammenfassung

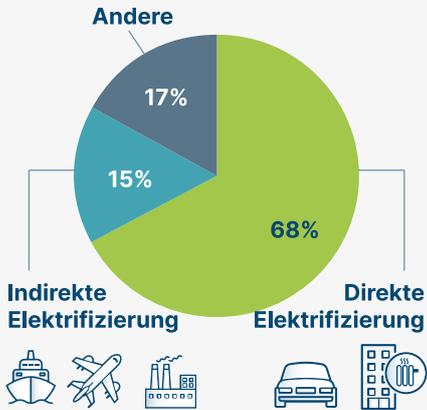


Energy
Transitions
Commission



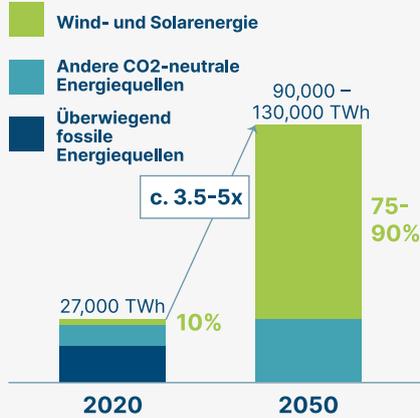
EINE ELEKTRIFIZIERTE WIRTSCHAFT

Endenergiebedarf - ETC 2050 indikatives Szenario



MASSIVER AUSBAU EINER SAUBEREN STROMVERSORGUNG

Stromerzeugung, TWh



OHNE ZUSÄTZLICHE SYSTEMKOSTEN FÜR DIE STROMERZEUGUNG

Gesamterzeugungskosten, \$/MWh

2020 basierend auf fossilen Brennstoffen

Erzeugung \$59

2030 basierend auf erneuerbaren Energien

Erzeugung \$28

Flexibilität \$29

Was ist notwendig?

STARKER ANSTIEG DER INVESTITIONEN IN WIND- UND SOLARENERGIE

Milliarden \$ pro Jahr

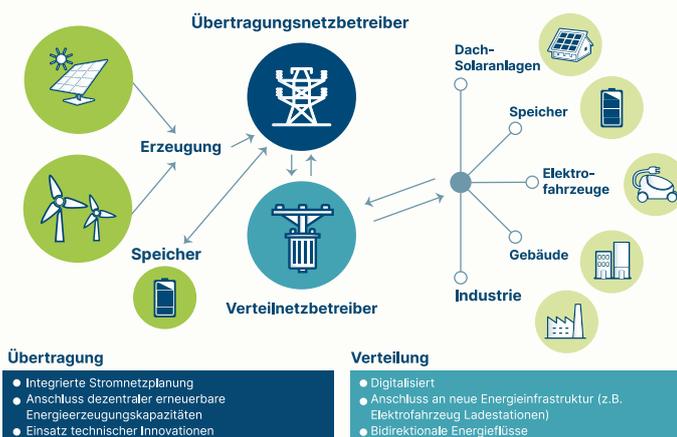


FLEXIBILISIERUNG DER STROMERZEUGUNG

Indikatives Lastprofil



AUFRÜSTUNG UND DIGITALISIERUNG VON ÜBERTRAGUNGS- UND VERTEILNETZNETZWERKEN



AUSSTIEG AUS DER KONVENTIONELLEN STROMERZEUGUNG AUS FOSSILEN BRENNSTOFFEN





Zusammenfassung

Um die globale Erderwärmung auf unter 2°C, und wenn möglich auf einen Wert von 1,5°C zu begrenzen, muss die Welt die Netto-Treibhausgasemissionen bis Mitte des Jahrhunderts auf null reduzieren. Um das zu erreichen, müssen wir so viele wirtschaftliche Vorgänge wie möglich elektrifizieren, bei vielen anderen hauptsächlich durch Strom hergestellten Wasserstoff nutzen und die Stromversorgung vollständig dekarbonisieren. Auch anderen Technologien wie die Abscheidung und Speicherung oder Nutzung von Kohlenstoff (CCS/U) und nachhaltige Bioenergie müssen ebenfalls eingesetzt werden. Sauberer Strom ist der Grundbaustein einer kohlenstofffreien Wirtschaft.

Die direkte Elektrifizierung wird der Schlüssel zur Dekarbonisierung vieler Wirtschaftssektoren sein, unter anderem beim Straßenverkehr und der Gebäudeheizung, wobei der Anteil des Stroms am Endenergiebedarf von heute nur 20% bis zur Mitte des Jahrhunderts auf über 60% steigen wird. Eine wichtige Rolle wird außerdem Wasserstoff bei der Dekarbonisierung von Sektoren spielen, die nicht so leicht elektrifiziert werden können, wie etwa in der Stahlindustrie und der Langstreckenschifffahrt. Wasserstoff wird wahrscheinlich weitere 15-20% des Endenergiebedarfs ausmachen [Abbildung A]. Zusammengenommen erfordert dies eine drastische Steigerung der weltweiten Stromversorgung, von heute 27.000 TWh auf bis zu 130.000 TWh im Jahr 2050. Die Verbesserung der Energieproduktivität sollte eine der Hauptprioritäten sein. Sie wird aber die Notwendigkeit einer massiven Zunahme bei der Stromversorgung nicht beseitigen.

Es wird eine große Herausforderung sein, eine vollständig saubere Elektrifizierung zu erreichen, aber wenn der Wandel effektiv gehandhabt wird, wird er sich amortisieren. Die Gesamtkosten für Stromsysteme, die zu 90% aus erneuerbaren Energien bestehen, werden nicht höher sein als bei heutigen Systemen, die auf fossilen Brennstoffen basieren. Eine saubere Elektrifizierung wird mit einer besseren Luftqualität und geringerer Lärmbelastigung auch erhebliche Vorteile für die lokale Umwelt bringen.

Eine frühzeitige Dekarbonisierung des Stroms – vor der gesamtwirtschaftlichen Dekarbonisierung – muss daher auf dem Weg aller Länder zu Netto-Null-Emissionen im Mittelpunkt stehen. Die Energy Transitions Commission ist der Auffassung, dass:

- **Alle Industrieländer** sich dazu verpflichten können und sollten, bis 2050 eine CO₂-neutrale Wirtschaft zu werden, um bis **Mitte der 2030er Jahre** eine nahezu vollständige Dekarbonisierung der Elektrizität zu erreichen, wobei die Kohlenutzung fast sofort abgeschafft werden sollte und klare Pläne für den Ergas-Ausstieg vorliegen müssen. In diesen Regionen wird die gesamte Stromnutzung bis zum Jahr 2050 wahrscheinlich um das 2 bis 2,5-fache steigen.
- Die **Entwicklungsländer** können und sollten sich dazu verpflichten, bis spätestens 2060 eine Netto-Null-Wirtschaft zu werden und bis **Mitte der 2040er Jahre** eine nahezu vollständige Dekarbonisierung der Energieversorgung zu erreichen. Der Stromverbrauch wird bis 2050 oft um das 5 bis 6-fache zunehmen müssen, wobei das Wachstum der Stromerzeugung fast ausschließlich durch kohlenstofffreie Quellen und ein Ausstieg aus den bestehenden Kohlekraftwerken in den 2030er und 2040er Jahren erreicht werden muss.

- **Einkommenschwache Volkswirtschaften** (z. B. Subsahara-Afrika) können und sollten anstreben, fossile Brennstoffe zu überspringen. Sie können die Stromversorgung massiv ausbauen – um bis zum Jahr 2050 eine Verzehnfachung des Stromverbrauchs zu bedienen – indem sie kohlenstofffreie Stromsysteme bauen, ohne dabei je auf fossile Brennstoffe zurückzugreifen.

Diese Ziele sind zweifelsfrei erreichbar. Aber sie werden nur erreicht, wenn die Länder sowohl für die Elektrifizierung als auch für die Dekarbonisierung der Stromversorgung klare strategische Pläne aufstellen, die massive Investitionen freisetzen.

Dieser Bericht behandelt:

- Elektrifizierung plus Wasserstoff als Schlüsselwege zur Dekarbonisierung;
- Wie kohlenstofffreier Strom zu geringen Kosten hergestellt werden kann;
- Wie kohlenstofffreie Kraftwerkssysteme gebaut und finanziert werden können;
- Eine Zusammenfassung der wichtigsten Maßnahmen, die in den nächsten zehn Jahren erforderlich sind.

Indikativer Endenergiebedarf in einer CO₂-neutralen Wirtschaft

EJ/Jahr

ILLUSTRATIVES SZENARIO

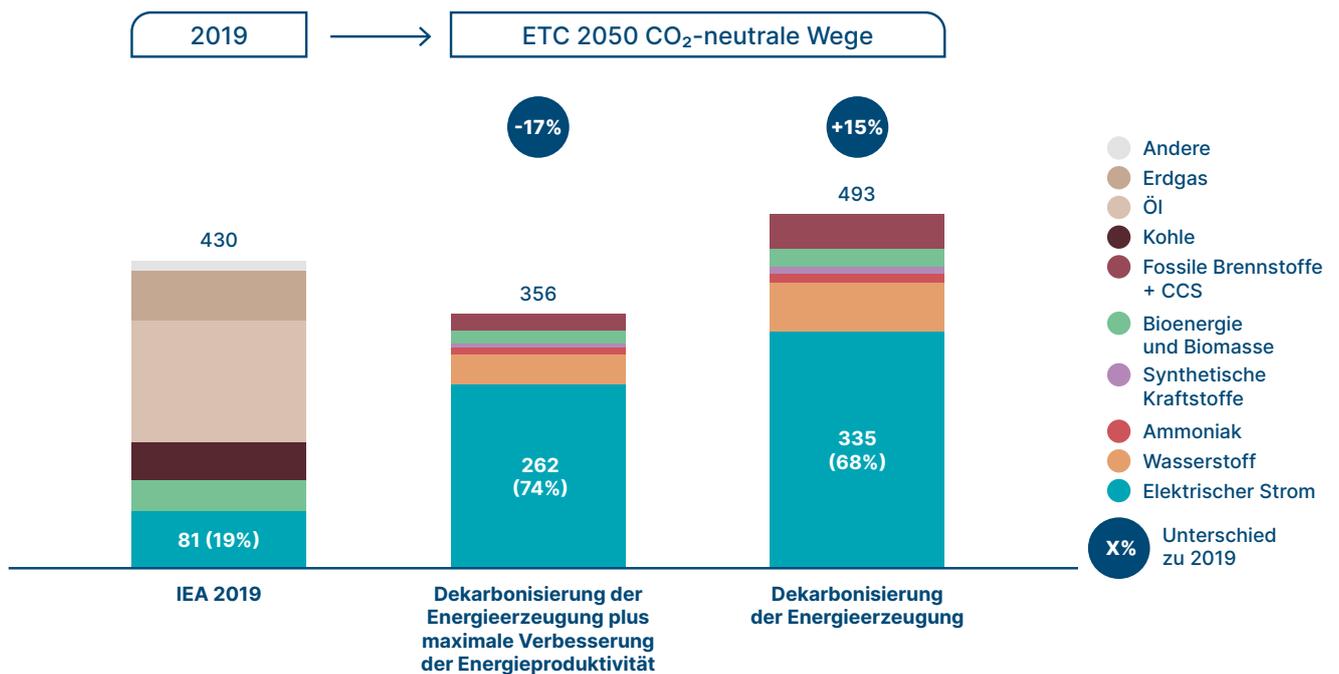


Abbildung A

Quelle: SYSTEMIQ-Analyse für die Energy Transitions Commission (2021); IEA (2020), *World Energy Outlook*

I. Massive Elektrifizierung vorantreiben, um eine kohlenstofffreie Wirtschaft zu erreichen

Alle Expertenanalysen gehen davon aus, dass Elektrifizierung eine dominante Rolle spielen wird um die Wirtschaft zu dekarbonisieren. Unsere ETC-Szenarien deuten darauf hin, dass der weltweite Strombedarf von heute 27.000 TWh bis zum Jahr 2050 auf 90-130.000 TWh ansteigen wird.

Massenelektrifizierung – der massive Anstieg des Strom- und Wasserstoffbedarfs

Das Wirtschaftswachstum und der zunehmende Wohlstand werden den Strombedarf der bestehenden Einsatzmöglichkeiten in die Höhe treiben. Darüber hinaus werden wichtige neue Einsatzmöglichkeiten für Strom oder Wasserstoff entstehen.

Straßenverkehr

Im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge machen fallende Batteriepreise es unausweichlich, dass Elektrofahrzeuge (sowohl bei den Anschaffungskosten als auch im Betrieb) günstiger sein werden als Verbrennungsmotoren. Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge ist es wahrscheinlich, dass für große LKWs, die sehr lange Strecken zurücklegen, nicht nur Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, sondern auch batteriebetriebene Elektrofahrzeuge eine wichtige Rolle spielen werden. Insgesamt könnte der Straßenverkehr mit Strom- und Wasserstoffantrieb bis zum Jahr 2050 eine Nachfrage von 12.000 bis 18.000 TWh generieren.

Schiff- und Luftfahrt

Die direkte Elektrifizierung wird eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung der Kurzstreckenschifffahrt und der Luftfahrt spielen. Aber der vorrangige Weg zur Dekarbonisierung der Langstreckenschifffahrt und der Luftfahrt wird wahrscheinlich die Nutzung von flüssigen Kraftstoffen sein, die in weitgehend unveränderten Motoren verbrannt werden. Unsere Szenarien für diese Sektoren deuten auf einen potenziellen Bedarf von 8.000-12.000 TWh Strom bis zum Jahr 2050 hin, wobei der Großteil davon dafür verwendet wird, grünen Wasserstoff und auf Wasserstoff basierende Kraftstoffe herzustellen.

Gewerbe- und Wohngebäude

Der Stromverbrauch in Gewerbe- und Wohngebäuden wird zum Teil durch vorhandene Anwendungen wie Elektrogeräte, Klimaanlage und IT-Geräte bestimmt. Darüber hinaus wird Strom mit ziemlicher Sicherheit bei der Raumheizung eine größere Rolle spielen. Insgesamt könnte der Stromverbrauch für die Gebäudeheizung bis zum Jahr 2050 etwa 20.000 bis 22.000 TWh erreichen.

Industrie

Die meisten Fertigungsprozesse sind bereits elektrifiziert. Darüber hinaus können die direkte Elektrifizierung und die Nutzung von Wasserstoff Lösungen sein, um Sektoren wie Stahl, Zement und Chemikalien zu dekarbonisieren. Insgesamt schätzen wir, dass die Sektoren der Schwerindustrie bis zum Jahr 2050 einen Bedarf von 8.000-16.000 TWh Strom haben werden, hauptsächlich um grünen Wasserstoff herzustellen.

Vergleich von grünem und blauem Wasserstoff: Auswirkungen auf den Strombedarf

Die zukünftige Nachfrage nach Elektrizität wird nicht nur von der Rolle von Elektrizität und Wasserstoff für Endanwendungen abhängen, sondern auch davon, ob sauberer Wasserstoff über einen „blauen“ Weg (der eine Dampf- oder autotherme Methan-Reformierung in Kombination mit CCS vorsieht) oder über einen „grünen“ Weg (Elektrolyse von Wasser) produziert wird.

Der Parallelbericht der ETC über Wasserstoff erläutert, dass obwohl beide Wege wahrscheinlich eine bedeutende Rolle spielen werden, grüner Wasserstoff in den 2030er Jahren jedoch an den meisten Standorten vermutlich kostengünstiger sein wird als

blauer Wasserstoff.¹ Unsere Szenarien gehen daher davon aus, dass im Jahr 2050 85% des Wasserstoffs über den grünen Weg produziert werden wird. Der gesamte Strombedarf von etwa 130.000 TWh im Jahr 2050 könnte also etwa 30.000 TWh beinhalten, die für die Erzeugung von Wasserstoff verwendet werden [Abbildung B].

Verbesserung der Energieproduktivität der Weltwirtschaft

Die Verbesserung der Energieproduktivität – durch technische Energieeffizienz, Materialeffizienz, Dienstleistungseffizienz und Verhaltensänderungen – ist ein wesentlicher Hebel, um den Umfang der Investitionen zu verringern, der für die Dekarbonisierung der Energieversorgung erforderlich ist. Sie sollte daher bei den Interventionen der Politik und des Privatsektors ein Hauptschwerpunkt sein. Eine saubere Elektrifizierung wird eine wesentliche Verbesserung der Energieeffizienz unterstützen. Aber selbst beim größtmöglich denkbaren Fortschritt würde der Strombedarf bis zum Jahr 2050 weltweit auf etwa 90.000 TWh ansteigen, dreimal so hoch wie heute.

Globale und regionale Steigerungen

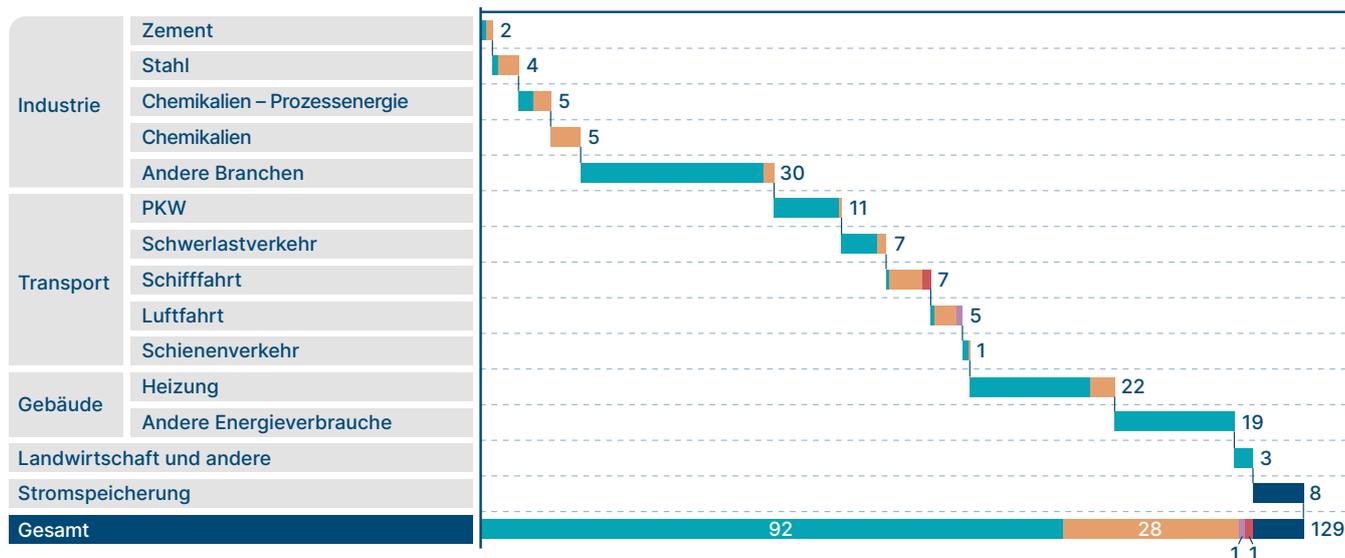
Um eine kohlenstofffreie Volkswirtschaft zu erreichen, ist ein große Steigerung des Stromangebots über alle Jahrzehnte hinweg erforderlich, wobei die Nachfrage Anfang der 2040er Jahren am stärksten zunehmen wird. Umfang und Tempo des Wachstums werden von Land zu Land unterschiedlich sein:

- Bereits jetzt könnten reiche Industrieländer bis zum Jahr 2050 einen 2 bis 2,5-fachen Anstieg verzeichnen.
- Für China wird ein ähnliches Gesamtwachstum bis zum Jahr 2050 erwartet (von 7.000 TWh auf 15.000 TWh bis zum Jahr 2050).
- In den Entwicklungsländern (z. B. Indien) werden Wirtschaftswachstum und der steigende Lebensstandard wahrscheinlich über Jahrzehnte hinweg zu einem ziemlich schnellen Wachstum führen, wobei der gesamte Stromverbrauch bis zum Jahr 2050 um das 5 bis 6-fache zunehmen wird.
- In einkommensschwachen Ländern könnte ein massiver Anstieg des Stromverbrauchs zu verzeichnen sein (z. B. um das Zehnfache über 30 Jahre), wobei das zeitliche Profil vom Erfolg der wirtschaftlichen und sozialen Entwicklungsstrategien abhängt.

Elektrizität wird sektorübergreifend eine große Rolle spielen

- Endverbrauch
- Produktion von Wasserstoff
- Produktion synthetischer Kraftstoffe
- Produktion von Ammoniak (Haber-Bosch-Verfahren)
- Stromspeicherung und Flexibilität

Stromendverbrauch in einer CO₂-neutralen Wirtschaft, ETC Dekarbonisierung der Energieerzeugung Szenario
000 TWh/Jahr



QUELLE: SYSTEMIQ-Analyse für die Energy Transitions Commission (2021)

1 ETC (2021), *Making the Hydrogen Economy Possible (Der Weg zur nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft): Accelerating clean hydrogen in an electrified economy (Ausbau von nachhaltigem Wasserstoff in einer elektrifizierten Weltwirtschaft)*

II. Kohlenstofffreie Stromversorgung zu geringen Kosten: hoch flexible erneuerbare Stromsysteme sind technisch machbar und kostengünstig

Eine massive saubere Elektrifizierung kann zu minimalen Kosten sowohl für die Weltwirtschaft als auch für die meisten Ländern erreicht werden. Daher sollten alle Länder planen, das gesamte Wachstum der Stromversorgung aus kohlenstofffreien Quellen zu generieren, und Pläne für den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen entwickeln.

Dekarbonisierung der Stromerzeugung zu geringen, Null- oder negativen Kosten

Dramatische Kostensenkungen bei der Erzeugung erneuerbarer Energien und bei wichtigen Speichertechnologien machen es jetzt möglich, die Stromerzeugung zu Null- oder in einigen Fällen zu negativen Kosten zu dekarbonisieren. In den letzten 10 Jahren sind die Kosten für erneuerbaren Strom stark gesunken. BloombergNEF prognostiziert eine weitere Senkung von 70% für Solar, 50% für Onshore- und 45% für Offshore-Wind bis zum Jahr 2050². Ein noch schnellerer Preisverfall ist jedoch möglich. Selbst auf dem derzeitigen Kostenniveau ist Strom aus erneuerbaren Energien günstiger als neue Kohle- oder Gaskraftwerke in Ländern, die 90 % der derzeitigen Stromerzeugung ausmachen³. In vielen Ländern sind neue Wind- und Solaranlagen bereits günstiger als die marginalen Kosten für den Betrieb einiger bestehender Kohle- und Gaskraftwerke, und dieser Vorteil wird mit der Zeit noch zunehmen.⁴

Ausgleich von Stromsystemen basierend auf erneuerbaren Energien – eine ernste, aber überschaubare Herausforderung

Die entscheidende Frage ist daher nicht mehr die relativen Erzeugungskosten aus erneuerbaren Energien im Vergleich zu der Erzeugung aus fossilen Brennstoffen, sondern wie man Angebot und Nachfrage in Systemen mit einem zunehmend variablen Anteil an erneuerbarer Energie kosteneffizient ausgleichen kann. Das Ausmaß und die Art dieser Herausforderung unterscheidet sich je nach Region. Aber in fast allen Ländern kann für die drei hauptsächlichen Herausforderungen beim Ausgleich eine höhere Anzahl von Speicher- und Flexibilitätsoptionen eine kosteneffiziente Lösung bieten [Abbildung C]: täglicher Ausgleich (z. B. über Batterien), vorhersehbarer saisonaler Ausgleich (z. B. über den Überbau von Kapazitäten variabler erneuerbarer Energien) und unvorhersehbarer Ausgleich von Woche zu Woche (z. B. durch Spitzenlastkraftwerke, die Wasserstoff verwenden).

Angebot abrufbarer Energieerzeugung und -speicherung sowie nachfrageseitiger Flexibilitätsoptionen

		Täglich	Saisonal (vorhersehbar)	Woche für Woche (unvorhersehbar)
 Abrufbare Energieerzeugung	Andere CO ₂ -neutrale	Wasserkraft, Kernkraft ¹	✓	✓
	Fossile	Fossil (oder Bioenergie) + CCS	✓	✓
		Fossil – sehr geringe Nutzung	✓	✓
 Energiespeicherung	Pumpspeicherkraftwerke	✓	✓	✓
	Lithium-Ionen-Akkus ²	✓		
	Aufstrebende Technologien	✓		
	Power-to-X Energie ³	✓	✓	✓
 Nachfrageseitige Flexibilität	Elektromobilität (intelligentes Laden, V2G)	✓		
	Heizlast	✓		
	Industrielast ⁴	✓	✓	

ANMERKUNGEN: ¹ Begrenzte Kapazität Nuklearkraftwerke flexibel zu regeln. ² Grosse Li-Ionen-Speicher auf der Seite des Energienutzers. ³ Beispiele für Power-to-x Energie sind Wasserstoff aus der Elektrolyse und die Rückumwandlung von Wasserstoff in Strom über Gasturbinen oder Brennstoffzellen. Das beinhaltet auch Elemente nachfrageseitiger Flexibilität, da die Produktion (z. B. Wasserstoff über Elektrolyse) auf für das System optimale Zeiten ausgerichtet werden kann. ⁴ Einschließlich Wasserstoff-Elektrolyse.

QUELLE: Übernommen aus: Climate Policy Initiative for the Energy Transitions Commission (2017), *Low-cost low-carbon power systems*

2 BloombergNEF (2020), *2H LCOE Update*
 3 BloombergNEF (2020), *2H LCOE Update*
 4 BloombergNEF (2020), *2H LCOE Update*

Angesichts dieser zunehmend kosteneffizienten Ausgleichsoptionen haben die Berechnungen der maximal kostengünstigen Anteile an erneuerbarer Energieerzeugung im Stromsystem in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Unsere ETC-Szenarien zeigen einen Anteil von 70 bis 90%.

Gesamtstromerzeugungskosten – voll wettbewerbsfähig mit fossilen Brennstoffen

Vollständig dekarbonisierte Stromsysteme sind somit machbar und werden in der Lage sein, Strom über Tage, Wochen und Jahre hinweg zu Kosten zu erzeugen, die mit den heutigen, auf fossilen Brennstoffen basierenden Systemen voll konkurrenzfähig sind (\$ 57/MWh in durchschnittlichen Gegenden). Die Bereitstellung von Speicher- und Flexibilitätskapazitäten, wird zusätzliche Kosten verursachen, insbesondere wenn der Anteil an erneuerbarer Energie über 80 % hinausgeht. Das wird jedoch durch die Tatsache ausgeglichen, dass die Generierungskosten für Energie aus erneuerbaren Quellen geringer sind als aus fossilen Brennstoffen [Abbildung D].

Gesamtsystemkosten für die Stromerzeugung in CO₂-neutralen Energiesystemen wahrscheinlich niedriger als die von fossil-basierten Energiesystemen

Gesamtsystem-Erzeugungskosten als Funktion der Durchdringung erneuerbarer Energien, \$/MWh, Kostenszenarien für 2020 und 2050

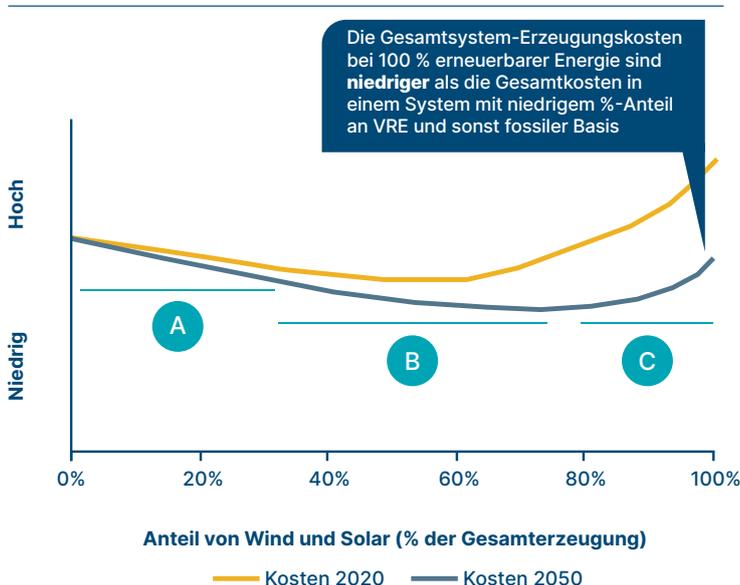


Abbildung D

QUELLE: Angepasst aus: TERI/ETC India (2020) *The Potential Role of Hydrogen in India*

- A** 0–30 % Durchdringung mit erneuerbarer Energie
Sinkende System-Erzeugungskosten, da kostengünstigere erneuerbare Energien fossile in der Grundlastenerzeugung ersetzen; kein Ausgleichsbedarf
- B** 30–80 % Durchdringung mit erneuerbarer Energie
Weitere Kostensenkungen, da erneuerbare Energien + Speicher zunehmend kostengünstiger sind als fossile Kraftwerke für abrufbare Erzeugung
- C** 80–100 % Durchdringung mit erneuerbarer Energie
Erhöhung der Gesamtsystem-Erzeugungskosten, da erhebliche Kosten erforderlich sind, um die „letzten 10–20 %“ der Erzeugung CO₂-neutral zu gestalten

Zusätzliche Kosten für Übertragungs- und Verteilnetze

Der Bedarf an Übertragungs- und Verteilnetzen wird drastisch zu nehmen, um den massiv erhöhten Stromverbrauch zu unterstützen. Der Ausbau der Übertragungs- und Verteilnetze wird sich auf die Kosten pro MWh auswirken, doch durch eine Reihe von Faktoren ausgeglichen und sich je nach Standort unterscheiden. Die Kosten für Übertragung und Verteilung könnten im Mittel steigen, etwa durch höhere Übertragungskosten, um dezentrale erneuerbare Energieerzeugungskapazitäten anzuschließen, aber intelligente tageszeitabhängige Nachfragesteuerung und Flexibilitätshebel könnten diese Netzkostensteigerungen kompensieren, indem sie die Gesamtkosten des Erzeugungssystems senken.

Natürliche Ressourcen – auf globaler Ebene eindeutig ausreichend

Auf globaler Ebene gibt es ausreichend leicht zugängliche natürliche Ressourcen, um eine massive saubere Elektrifizierung zu unterstützen. Wenn zum Beispiel 100.000 TWh der jährlichen Stromproduktion vollständig aus PV-Anlagen erzeugt würden, müssten nur 1 bis 1,2% der weltweiten Landfläche für Solarparks genutzt werden.⁵ Es gibt auch reichlich Bodenschätze (einschließlich Lithium und Nickel), um den Bedarf an Batterien und Stromsystemen einer stark elektrifizierten Volkswirtschaft zu decken. Mögliche

⁵ Ausgehend von 1,2 bis 1,7 ha/GWh/Jahr basierend auf NREL (2018), *Land-use Requirements for Solar Power Plants in the United States (Landnutzungsanforderungen für Solarkraftwerke in den USA)*. Siehe ETC (2018), *Mission Possible (Mission möglich)*.

kurzfristige Versorgungsengpässe und lokale Umweltauswirkungen müssen jedoch zeitnah bewältigt werden. Die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft von Materialien stellt einen wichtigen Hebel dar, um die Abhängigkeit von Primärressourcen zu verringern.

Herausforderungen und Lösungen in Ländern mit beschränkten Ressourcen

Wenn sich einige Regionen bei der Verfügbarkeit von Wind- und Solarenergie mit Herausforderungen konfrontiert sehen, kann dies entweder durch den Transport von Energie über große Entfernungen oder durch den Einsatz flächeneffizienter kohlenstofffreier Erzeugungsoptionen (z. B. durch Kernkraft, CCS bei der Wärmeerzeugung oder neue Formen erneuerbarer Technologien wie schwimmende Offshore-Windturbinen) überwunden werden. Angesichts der drastisch geringen Kosten für Solar- und Windenergie an einigen begünstigten Standorten dürfte der Transport sauberer Energie auch über sehr weite Entfernungen wirtschaftlich sein. Diese Chancen zu maximieren, wird bisweilen internationale Zusammenarbeit und Vertrauen erfordern, um Bedenken in Bezug auf die Energiesicherheit zu überwinden.

Ausstieg aus der konventionellen Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen

Alle Länder sollten sicherstellen, dass ab sofort der Ausbau der Stromerzeugung nahezu vollständig aus kohlenstofffreien Quellen stammt. Darüber hinaus müssen die Länder Strategien für den letztendlichen Ausstieg aus der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen erarbeiten. An vielen Standorten wird dies mit minimalen oder gar keinen wirtschaftlichen Kosten verbunden sein, da die Kosten für die Erzeugung von erneuerbarer Energie unter den marginalen Kosten für den Betrieb von Gas- oder Kohlekraftwerken liegen. Die Kapazitätsauslastung wird daher sinken, da viele fossile Kraftwerke entweder für das flexible Lastmanagement genutzt oder vorzeitig stillgelegt werden. Die politischen Entscheidungsträger sollten sich jedoch mit den Faktoren befassen, die den Fortschritt verzögern könnten, einschließlich bestehender langfristiger Festpreislieferverträge und der Herausforderung regionale Arbeitsplätze zu erhalten.⁶

- Die Industrieländer sollten sich verpflichten, die gesamte Kohleverstromung so schnell wie möglich, spätestens aber bis 2030, einzustellen, und einen Termin für den Erdgas-Ausstieg festzulegen.
- Die Entwicklungsländer sollten sich verpflichten, keine neuen Kohlekraftwerke zu bauen (was unwirtschaftlich wäre) und klare Termine für den Kohleausstieg in den 2040er Jahren festlegen.

III. Bau und Finanzierung von kohlenstofffreien Stromversorgungssystemen

Die Bereitstellung des in einer kohlenstofffreien Wirtschaft benötigten sauberen Stroms erfordert einen massiven Anstieg der Investitionen in erneuerbare Energien, andere kohlenstofffreie Erzeugungstechnologien sowie in Stromübertragungs- und -verteilnetze. Aus globaler makroökonomischer Sicht sind diese Investitionen leicht erschwinglich (weniger als 1,5 % des globalen BIP), aber sie werden nur schnell genug erfolgen, wenn die Regierungen ausreichend Marktsicherheit schaffen.

Umfang und Zeitpunkt des erforderlichen Investitionsbedarfs

Damit erneuerbare Energie bis zum Jahr 2050 75% bis 90% der Stromerzeugung liefern kann, müsste die installierte Gesamtkapazität von Windkraft von heute 640 GW bis zum Jahr 2050 auf 14.000 bis 16.000 GW steigen, während die Solarkapazität von heute 650 GW bis zum Jahr 2050 auf 26.000 bis 35.000 GW steigen müsste.⁷ Um diese Kapazitätsstufen bis 2050 zu erreichen, muss die jährliche Bereitstellung von Solar- und Windenergie in den nächsten zwei Jahrzehnten um das 10- bis 15-fache über das aktuelle Niveau steigen (bei Wind 700 bis 800 GW pro Jahr und bei Solar 1.400 bis 2.000 GW pro Jahr).⁸

Darüber hinaus müssen die Länder in einen Mix aus Kern-, Wasser- und CCS-Kraftwerken sowie in Batterie- und andere Speicherkapazitäten investieren. Der Gesamtinvestitionsbedarf in die Stromerzeugung könnte daher von heute 300 Mrd. \$ pro Jahr auf einen Spitzenwert von etwa 2 Billionen \$ in den Jahren 2040–45 steigen, bevor er danach langsam abnimmt.

⁶ RMI (2020), *How to Retire Early (Wie kann früher stillgelegt werden)*, TERI (2018), *Coal Transition in India (Umstellung auf Kohle in Indien)* und RMI/ETC China (2019), *China 2050: Eine voll entwickelte reiche kohlenstofffreie Volkswirtschaft*.

⁷ Historische Daten aus BloombergNEF (2020), *New Energy Outlook (Neuer Energie-Ausblick)*

⁸ Historische Daten aus BloombergNEF (2020), *New Energy Outlook (Neuer Energie-Ausblick)*

Auch die Investitionen in die Übertragungs- und Verteilnetze müssen drastisch steigen. Vernünftige Schätzungen gehen davon aus, dass die Investitionen in die Übertragungsnetze von heute 300 Mrd. \$ pro Jahr auf etwa 1 Billion \$ steigen könnten, während die Investitionen in die Verteilnetze von 180 Mrd. \$ pro Jahr auf 900 Mrd. \$ steigen könnten.

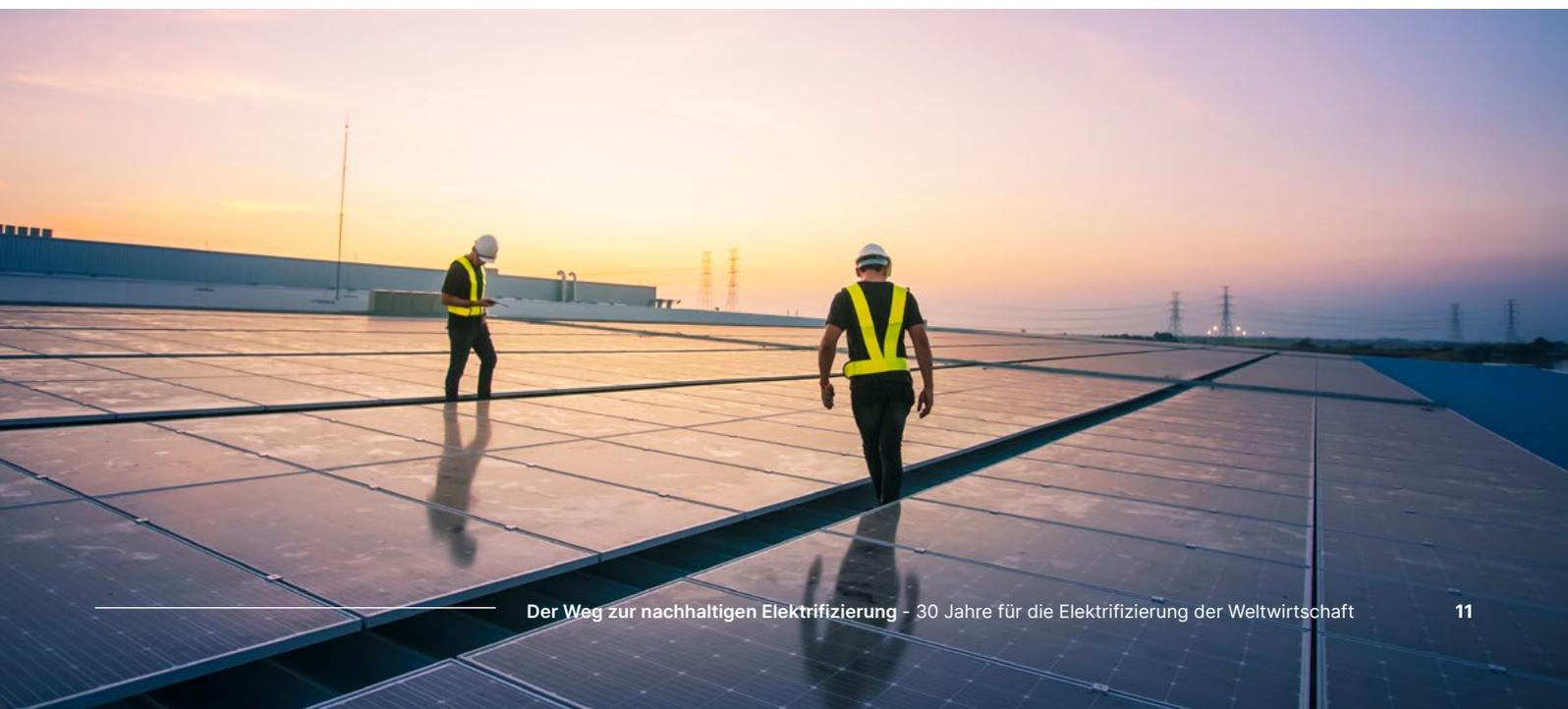
Die in den nächsten 30 Jahren erforderlichen Gesamtinvestitionen in das Energiesystem könnten daher mehr als 80 Billionen US-Dollar (oder über 2,5 Billionen US-Dollar pro Jahr) betragen – und würden etwa 80 % aller Investitionen ausmachen, die für den Bau eines kohlenstofffreien Energie-, Gebäude-, Industrie- und Transportsystems erforderlich sind [Abbildung E].

Der Elektrizitätssektor stellt die überwiegende Mehrheit der Gesamtinvestitionen dar, um CO₂-Neutralität im gesamten Energiesektor zu erreichen

Vision 2050		Bedarf für Schlüsselinvestitionen		Gesamtinvestition 2020-2050 in Mrd. USD	Jährliche Gesamtinvestitionen in Mrd. USD p. a.	Anteil am BIP in %
Energie	Gesamtstromerzeugung 110.000 TWh/a	Erneuerbare Energien und andere CO ₂ -neutrale Energieerzeugung	26–34 TW Solar 14–15 TW Wind 3,5 TW andere CO ₂ -neutrale Energieerzeugung	~46.000-47.000	~1.500-~1.600	~0,8%
	Erforderliche Gesamtkapazität 27–35 TW Solar 14–16 TW Wind 2–4 TW Wasserkraft, Kernkraft, andere CO ₂ -neutrale	Übertragung und Verteilung	~50 % der Erzeugung, frontgewichtet	~36.000	~1.100	~0,6%
		Batteriespeicher	14 TWh/d (5 % der täglichen Erzeugung)	~1.500	~50	~0,03%
		Saisonale Speicherung: H ₂ -Speicherung und/oder CCS bei Heizkraftwerken	4 TW thermische Kapazität ausgestattet mit CCS (5 % der Erzeugung) 1,5 TW Elektrolyse (2 % Leistungsverschiebung)	~3.800 ~430	~130 ~15	~0,07% ~0,05%
Wasserstoff im Endverbrauch	800 Mt/a für die sektoralen Endenergieverbräuche	Produktion	7,6 TW Elektrolyse 0,7 TW Kapazität für blauen Wasserstoff	~1.200	~40	~0,02%
		Transport und Lagerung	Salzkavernen und andere Speicher, Gaspipelines nachrüsten	~1.100	~40	~0,03%
Industrie	Stahl-, Zement- und Petrochemie-Industrie erreichen CO ₂ -Neutralität		CCS-Anwendung für Zement Wasserstoff-DRI oder CCS für Stahl Mehrere Formen von veränderten chemischen Produktionsprozessen	~1.600	~50	~0,03%
Transport	Ladeinfrastruktur	Vollständige Dekarbonisierung des Straßenverkehrs – 2 Mrd. Elektroautos und ~200 Mio. elektrische Lkw und Busse	~1000 Mrd. langsame private, 200 Mio. mittelschnelle öffentliche und 10 Mio. superschnelle Ladegeräte + Lkw- und Bus-Ladegeräte	~2.000	~70	~0,04%
	Luftfahrt und Schifffahrt	Betrieb aller Langstrecken mit CO ₂ -neutralen Kraftstoffen	F&E in Luftfahrt und grüne Schifffahrt, Investitionen in SAF-Anlagen sowie Nachrüstung von Schiffen und Tanks	~900	~30	~0,02%
Gebäude Energieeffizienz	IEA Investitionsprognose für bessere Gebäudeisolation, effizientere Beleuchtung und HVAC Systeme			~12.000-15.000	~400-500	~0,2%
Gesamt				~106-110.000	~3.600-3.700	~1,8%

QUELLE: SYSTEMIQ-Analyse für die Energy Transitions Commission (2021)

Abbildung E



Angemessene Planung für den Strommarkt

Bisher wurde das rasche Wachstum der Kapazitäten für erneuerbare Energien in der Regel über Auktionen und durch langfristige Vertragsstrukturen gefördert. Da die Kosten für die Erzeugung erneuerbarer Energie nun unter die Kosten für fossile Brennstoffe fallen, entfällt die Notwendigkeit für Subventionen oder wird bald verschwinden. Allerdings dürfen die Länder jetzt nicht dazu übergehen, sich bei der Unterstützung für Investitionen in erneuerbare Energie allein auf kurzfristige Märkte zu verlassen. Langfristige Verträge (ohne Subventionen, aber die langfristige Preissicherheit bieten) werden weiterhin erforderlich sein, um risikoarme Investitionsmöglichkeiten zu schaffen, die kostengünstiges Kapital in der erforderlichen Größenordnung und Geschwindigkeit anlocken können.

Kombiniert werden sollten sie mit (i) geeigneten Kurzfristmärkten, um eine effiziente Bereitstellung zu unterstützen, unter anderem neuen Märkten für die Beschaffung von Zusatzleistungen; (ii) langfristigen Mechanismen für Spitzenkapazitäten, (iii) der Entwicklung von Flexibilitätsfaktoren wie Echtzeitpreisgestaltung und intelligenten Abrechnungsmöglichkeiten und (iv) anderen Marktfaktoren wie Systembetreiberkapazitäten auf Verteilnetzebene.

Zu den weiteren Prioritäten gehören in den Entwicklungsländern (i) die fortschreitende Entwicklung hin zu liberalisierten Märkten, (ii) Reformen zur Verbesserung der Kostendeckungsrate und der Kreditwürdigkeit der Abnehmer sowie (iii) Regelungen zur Gewährleistung eines verbesserten Netzanschlusses für die Erzeugung erneuerbarer Energie.

Planungs-, Genehmigungs- und Grunderwerbssysteme zur Unterstützung eines schnellen Ausbaus von erneuerbaren Energien

Der Ausbau von erneuerbarer Energien wird oft durch langwierige Planungs- und Genehmigungsverfahren und/oder durch den Widerstand der Bevölkerung aufgrund örtlicher Auswirkungen oder Lärmbelästigung stark verzögert. Die Länder müssen daher für die künftige Entwicklung von erneuerbaren Energien explizite Strategien entwickeln, die die Einrichtung einer zentralen Anlaufstelle für Genehmigungsverfahren und Koordinierung zwischen den Regulierungsbehörden vorsieht und die Förderung dezentraler Stromerzeugung und/oder kommunaler Eigentumsmodelle miteinschließt, um lokale Unterstützung zu gewinnen.

Rahmenbedingungen für vorausschauende Investitionen in die Übertragungs- und Verteilnetze

Die oben umrissenen Planungs- und Genehmigungsdimensionen sind auch für Investitionen in Übertragungs- und Verteilnetze relevant. Darüber hinaus muss die Regulierung des Stromnetzes reformiert werden, um eine langfristige integrierte Planung zu ermöglichen, die den Bedarf an integrierten Netzentwicklungen weit im Voraus ermittelt und „vorausschauende Investitionen“ möglich macht. Die Ausweisung einiger Projekte als nationale Infrastrukturprioritäten und Investitionen in teurere Lösungen, um politische Widerstände gegen notwendige Entwicklungen (z. B. Erdverkabelung) zu überwinden, könnten ebenfalls dazu beitragen, den Ausbau zu beschleunigen.

Entwicklung von Lieferketten, um ein schnelles Investitionswachstum zu unterstützen

Angemessen schnelle Investitionen in saubere Stromerzeugung und Netze erfordern die Entwicklung umfangreicher Lieferketten, einschließlich Schlüsselmaterialien und -fähigkeiten, wie z. B. eine erweiterte PV- und Windturbinen-Produktion, sowie ein deutliches Wachstum der Batterieproduktion. Diese Entwicklungen sind innerhalb des geforderten Zeitrahmens physisch machbar, aber es ist entscheidend den Umfang der erforderlichen Lieferkette zu erkennen und vorherzusagen, um potenzielle lokale Engpässe bei Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie globale Engpässe bei wichtigen Materialressourcen zu verhindern.

Herausforderungen bei der Finanzierung in einigen Entwicklungsländern

In den meisten Ländern werden die vier soeben beschriebenen Maßnahmen, von einer strategischen Vision und quantitativen Zielen getragen, die ausreichend sind, um ein schnelles Investitionswachstum zu erzielen. In einigen Entwicklungs- und Schwellenländern könnten jedoch die Kosten und die Verfügbarkeit von Kapital für ein schnelles Wachstum ein erhebliches Hindernis darstellen. Die rasche Entwicklung sauberer Stromversorgungssysteme wird daher im großen Maße davon abhängen, welche Rolle multinationale und nationale Entwicklungsbanken spielen, die neben der Finanzierung auch Beratung bei der Richtliniengestaltung bieten können.⁹ Investitionen in saubere Stromversorgungssysteme (und der Kohlenausstieg) sollten daher für die Geldströme der „Klimafinanzierung“ von Industrieländern und für Chinas „Belt and Road“-Programm ein vorrangiger Schwerpunkt sein.

⁹ Siehe Blended Finance Taskforce (2018), *Better Finance, Better World*



2030 ZIELE:

ELEKTRIFIZIERUNG



**Weltweiter
Stromverbrauch
steigt um das
1,5-fache**

E-Autos fast 100% der
Neuwagenverkäufe in
Industrieländern, 50%+ in
Entwicklungsländern

Heizung zunehmend
elektrifiziert,
Gebäudenachrüstungen
im Gange

EINSATZ VON WIND UND SOLAR



**Wind- und
Solarenergie
erzeugen ~40%
der weltweiten
Stromproduktion**

5-7-fache Steigerung der
jährlichen Wind- und
Solarinstallationen

Vermehrter Einsatz von
Energiespeicher und
flexiblen CO₂-neutralen
Spitzenlastkraftwerken

AUSSTIEG AUS FOSSILEN BRENNSTOFFEN



**Emissions-
intensität des
Stromnetzes**

Industrie- länder <80 gCO ₂ /kWh	Entwicklungs- länder <180 gCO ₂ /kWh
--	--

Sofortiger Kohleausstieg

Deckung des gesamten
neuen Stromwachstums mit
Wind- und Sonnenenergie

6 KRITISCHE MASSNAHMEN

WICHTIGSTE BEISPIELE



The **Making Mission Possible** Series

Der Weg zur nachhaltigen Elektrifizierung:

30 Jahre für die Elektrifizierung der Weltwirtschaft

April 2021

Version 1.1

Zusammenfassung



Energy
Transitions
Commission