

APRIL 2019

Funded by



STIFTUNG
MERCATOR

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

GLOBAL ENERGY SYSTEM BASED ON 100% RENEWABLE ENERGY

Power, Heat, Transport and Desalination Sectors

Executive Summary (German)



Study by



P.O.Box 20
FI-53851 Lappeenranta
Finland
Tel.: +358 408171944
Email: manish.thulasi.ram@lut.fi



Albrechtstr. 22
10117 Berlin
Germany
Tel.: +49 30 609 898 810
Email: office@energywatchgroup.org

Zusammenfassung

Der Klimawandel wirkt sich in zunehmender Geschwindigkeit auf alle Kontinente der Erde aus. Die nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels werden sich bei einem Temperaturanstieg von 2°C über dem vorindustriellen Niveau massiv verschärfen. Eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5°C statt 2°C bis zur Mitte des Jahrhunderts könnte sowohl die Gefahr von klimabezogenen Risiken, als auch die Anfälligkeit für negative wirtschaftliche Auswirkungen etwas verringern. In allen kohlenstoffemittierenden Sektoren der Weltwirtschaft ist ein rascher und grundlegender Wandel erforderlich, insbesondere im Energiesektor, der für den größten Teil der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Es besteht die dringende Notwendigkeit, dass die Weltgemeinschaft einen gemeinsamen Weg hin zu Null Treibhausgasemissionen beschreitet und dies kann nur mit Hilfe einer zeitnahen und vollständigen Energiewende hin zu 100% erneuerbaren Energien gelingen. Es gibt immer noch viele Länder und Regionen, die bisher noch keine Pläne mit kurzfristigen Maßnahmen und langfristigen Energiezielen verabschiedet haben, um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen.

Die von der finnischen LUT University (LUT) und der Energy Watch Group (EWG) durchgeführte Studie präsentiert einen ersten technologiebezogenen, multisektoralen, multi-regionalen und kostenoptimalen Weg der globalen Energiewende. Unter der Leitung von Prof. Dr. Christian Breyer führte eine Gruppe von 14 der weltweit führenden Wissenschaftler im Bereich der Energiewende die Studie über viereinhalb Jahre durch. Mit Hilfe der wegweisenden Energiewende-Modellierung der LUT wurden vollständige, stündliche geo-räumliche Auflösungen verwendet, um den kostenoptimalen Mix von Technologien basierend auf den jeweilig lokal verfügbaren erneuerbaren Energiequellen zu

berechnen. Die für diese Studie durchgeführte Forschung liefert damit eine kostenoptimierte Simulation von Energiesystemen für 145 globale Regionen. Diese wurden im Rahmen der Studie in neun großen Weltregionen zusammengefasst. Sie ist ein technoökonomischer Entwurf, der den kostengünstigsten und realisierbaren Energiemix aufzeigt, auf dessen Grundlage die Umstellung der globalen Strom-, Wärme-, Verkehr- und Entsalzungssektoren bis 2050 gelingen kann und dabei die Emissionen in den Energiesektoren auf Null reduziert.

Die Studie zeigt, dass ein weltweit 100% erneuerbares Energiesystem mit Null Treibhausgasemissionen in allen Energiesektoren sogar vor 2050 erreicht werden kann, und dies preiswerter als das derzeitige Energiesystem, welches zum Großteil aus fossilen Brennstoffen und Nuklearenergie besteht. Vor allem Solar- (PV) und Windenergie tragen die Hauptlast eines neuen, globalen Energiesystems. Die Solarenergie ist dabei die wichtigste Stromquelle, die 2050 etwa 69% der gesamten Energieversorgung ausmachen wird. Hinzu kommen 18% Windenergie, 5% Bioenergie, 3% Wasserkraft und 2% Geothermie. Dies entspricht einer installierten Gesamtleistung von rund 63.400 Gigawatt Solarstrom und 8.000 Gigawatt Windenergie, weltweit bis 2050. PV-Prosumenten beschleunigen die Dezentralisierung der Energiewende in den verschiedenen Weltregionen und erreichen im Jahr 2050 einen Anteil an der weltweiten Stromerzeugung von etwa 19%. Die Elektrifizierung der Bereiche Energie, Wärme, Verkehr und Entsalzung ermöglicht zu dem eine kostengünstige Versorgung mit erneuerbaren Energien. Ein zu 100% erneuerbares Energiesystem ist dementsprechend effizienter und kostengünstiger als das derzeitige System, basierend auf fossiler und Nuklearenergie.

Energienachfrage

Die Energiewende ist durch eine grundlegende Veränderung des gesamten Energiesektors geprägt, der derzeit überwiegend auf fossilen Brennstoffen basiert. Wie aus Abbildung ES-1 hervorgeht, führt die Elektrifizierung des gesamten Energiesektors, bestehend aus Strom, Wärme, Verkehr und Entsalzung, zu einem Primärenergieanteil von 90%

erneuerbarer Elektrizität bis 2050 und zu null Prozent fossilen Brennstoffen im Energiemix. Dies ist eine vollständige Abkehr von der Primärenergieversorgung des Energiesystems 2015, das hauptsächlich aus fossilen Brennstoffen (89%) und nur zu 4% Strom aus erneuerbaren Energien bestand.

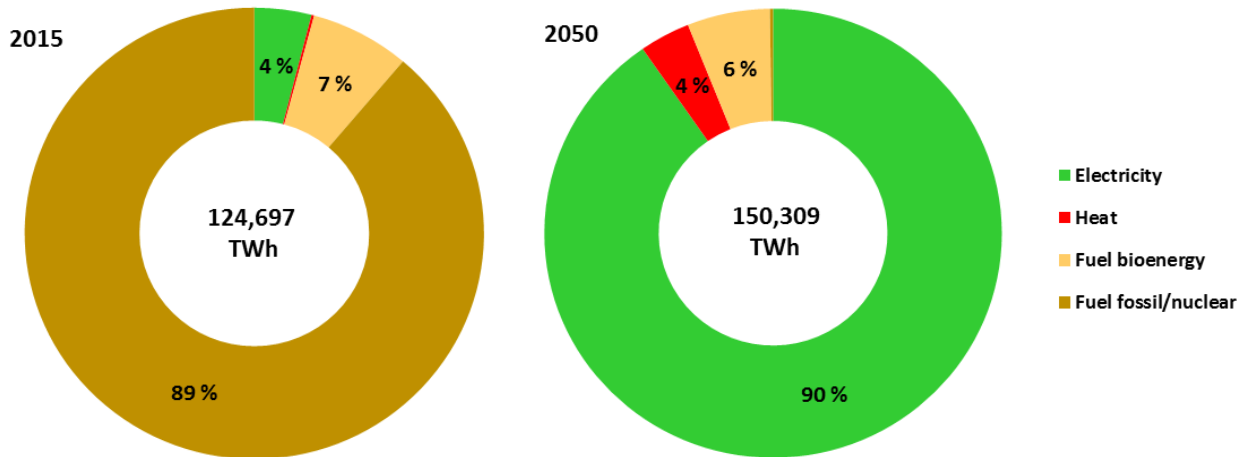


Abbildung ES-1: Anteile der Hauptkraftstoffe am gesamten Primärenergiebedarf in den Jahren 2015 und 2050

Die kumulierte durchschnittliche Wachstumsrate des weltweiten Energiebedarfs von rund 1,8% treibt die Energiewende an (Abbildung ES-2). Hierdurch wird eine wachsende Nachfrage nach energienahen Dienstleistungen, wie Strom und Wärme, Verkehr und Entsalzung und Verkehr sowie energieeffizienten Technologien ermöglicht. Die fortschreitende Elektrifizierung erhöht die Gesamtenergieeffizienz massiv und ermöglicht eine hohe Wachstumsrate der bereitgestellten Energiedienstleistungen. Der Primärenergiebedarf

sinkt so von rund 125.000 TWh im Jahr 2015 auf fast 105.000 TWh bis 2035 und steigt erst danach bis 2050 auf über 150.000 TWh. Im Vergleich dazu würden herkömmliche Verfahren mit einer geringeren Elektrifizierung zu einem Primärenergiebedarf von fast 300.000 TWh bis 2050 führen (Abbildung ES-2). Die enorme Steigerung der Energieeffizienz ist in erster Linie auf die hohe Elektrifizierung von rund 90% des Primärenergiebedarfs zurückzuführen und spart fast 150.000 TWh ein.

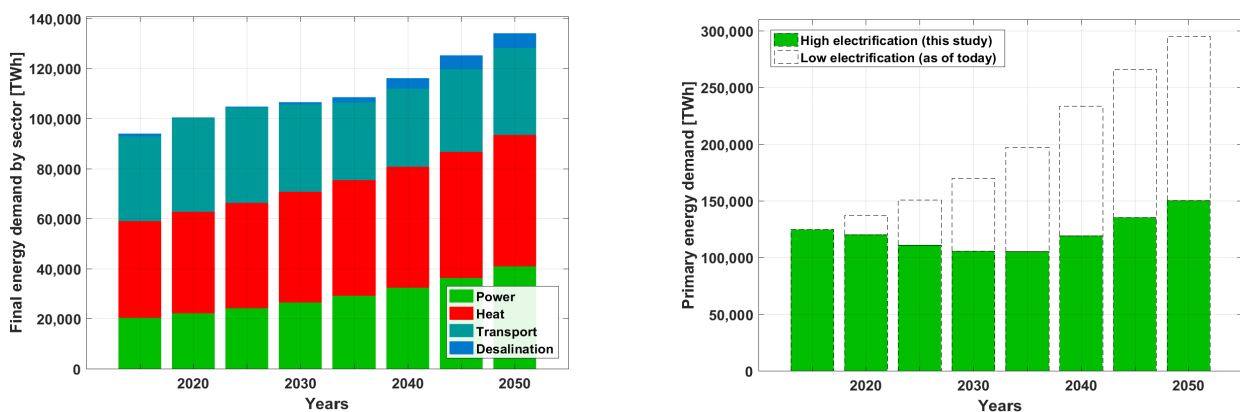


Figure ES-2: Sectoral final energy demand through the transition (left) and primary energy demand with high electrification and low electrification through the transition (right).

Primärenergieversorgung

Gleichzeitig mit der zunehmenden Verschiebung der Primärenergieversorgung in Richtung Strom, steigt der Anteil der erneuerbaren Energien von rund 10% im Jahr 2015 auf 100% bis 2050. Solar- und Windenergie werden mit ca. 76% und 20% die bedeutendsten Stromquellen der gesamten Primärstromversorgung bis 2050 in den Bereichen

Strom, Wärme, Verkehr und Entsalzung (Abbildung ES-3). Solarenergie basiert sowohl auf Prosumer-PV-Anlagen, als auch einachsigen und fest geneigten PV-Anlagen. Darüber hinaus hat Wasserkraft einen Anteil von 3% an den erneuerbaren Energiequellen, die Biomasse 6%, die Geothermie 2% und weitere erneuerbare Energieträger abermals 2%.

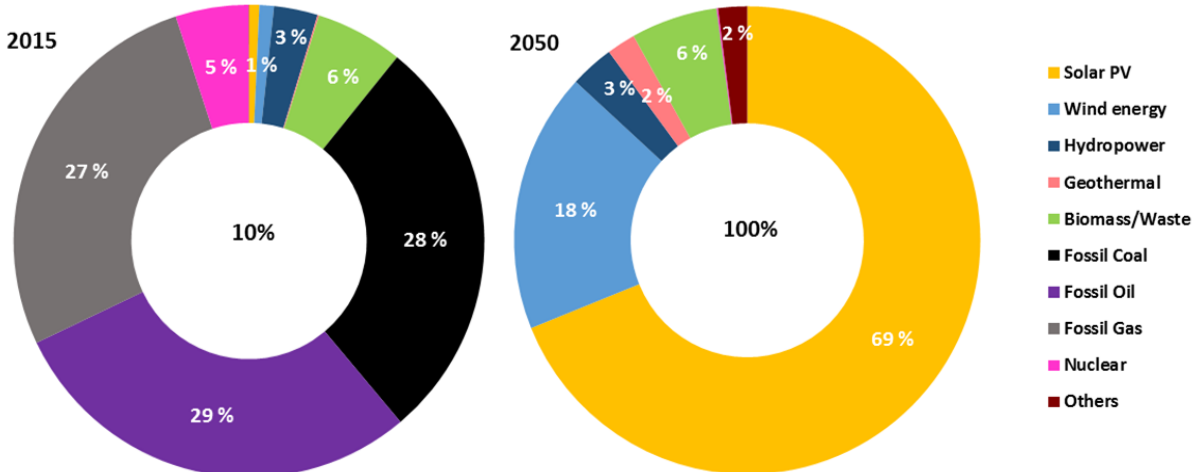


Abbildung ES-3: Anteile der Primärenergieversorgung in den Bereichen Energie, Wärme, Verkehr und Entsalzung in den Jahren 2015 und 2050.

Wärmeversorgung

Die im Jahr 2015 noch zu 85% auf fossilen Brennstoffen beruhende Wärmeversorgung wird im Jahr 2050 vollständig durch erneuerbare Energien gedeckt. Wärmepumpen spielen eine bedeutende Rolle und haben einen Anteil von etwa 44%, gefolgt von 26% direkter elektrischer Beheizung und 12% aus Biomasse gewonnener Wärme. (Abbildung ES-

4). Darüber hinaus trägt erneuerbares Gas im Jahr 2050 rund 12% zur Wärmeversorgung bei. Gas wird als Brennstoff in der Energiewende durch erneuerbaren Strom und Biomethan von einem fossilen Energieträger zum synthetisch erzeugten, erneuerbaren Energieträger.

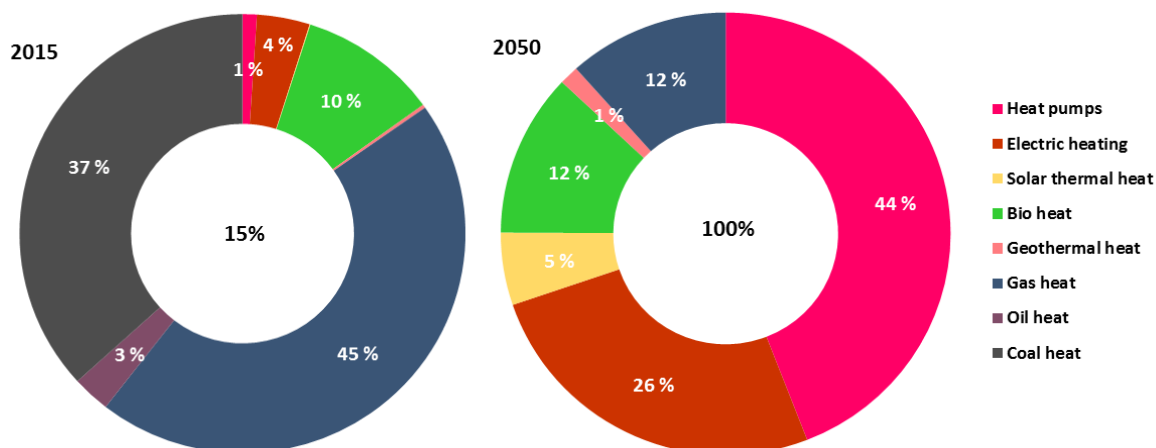
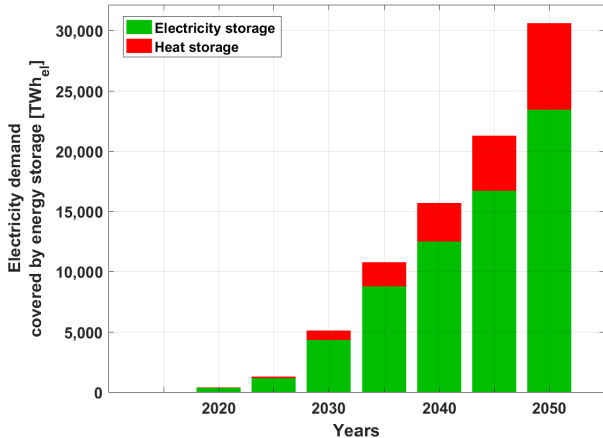


Abbildung ES-4: Wärmeversorgung in den Jahren 2015 und 2050.

Energiespeicherung

Energiespeicherung spielt eine entscheidende Rolle beim Übergang des globalen Energiesystems zu 100% erneuerbaren Energien. Eine Kombination aus Strom- und Wärmespeichertechnologien deckt den



Energiebedarf während der gesamten Übergangszeit ab (siehe Abbildung ES-5). Der Energiespeicher deckt im Jahr 2050 etwa 23% des Strombedarfs und etwa 26% des Wärmebedarfs ab.

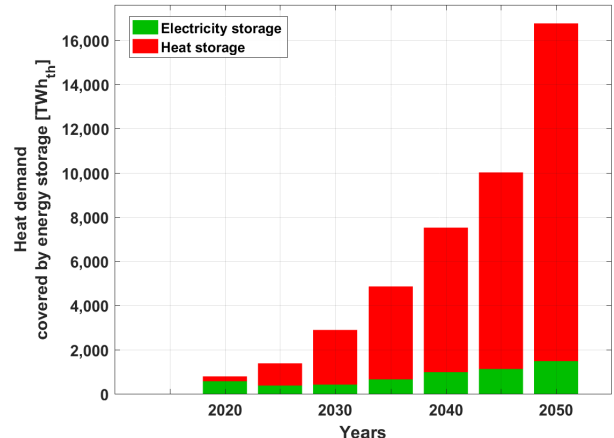


Abbildung ES-5: Energiespeicherung durch den Übergang von 2015 bis 2050 für Strombedarf (links) und Wärmebedarf (rechts)

Herstellung synthetischer Kraftstoffe

Ein kritischer Aspekt für die Ermöglichung eines zu 100% erneuerbaren Energiesystems ist die Herstellung synthetischer Kraftstoffe. Technologien zur Umwandlung von Brennstoffen wie Fischer-Tropsch, Wasserelektrolyse, Methanisierung und weitere liefern erneuerbare Brennstoffe. Neben nachhaltig produzierten Biokraftstoffen wie Jatropha – Plantagen auf degradierten Böden – sichern Elektrifizierung und synthetische Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien einen zu 100% aus erneuerbaren Energien gespeisten Verkehrssektor auf der ganzen Welt. Die entsprechenden Kapazitäten der Technologien zur Kraftstoff-

produktion werden überwiegend nach 2035 eingeführt (Abbildung ES-6). Das Wärmemanagement spielt eine wichtige Rolle bei der effizienten Herstellung synthetischer Kraftstoffe. Rückgewonnene Wärme liefert einen hohen Anteil der Energie, die für die direkte Abscheidung von CO₂ benötigt wird. Diese liefert wiederum Kohlenstoff aus der Atmosphäre für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe. Die Nutzung von rückgewonnener Wärme und überschüssiger Wärme ist für eine kostenoptimale Energiewende im Verkehrssektor entscheidend. Dies wird besonders ab 2035 deutlich (Abbildung ES-6).

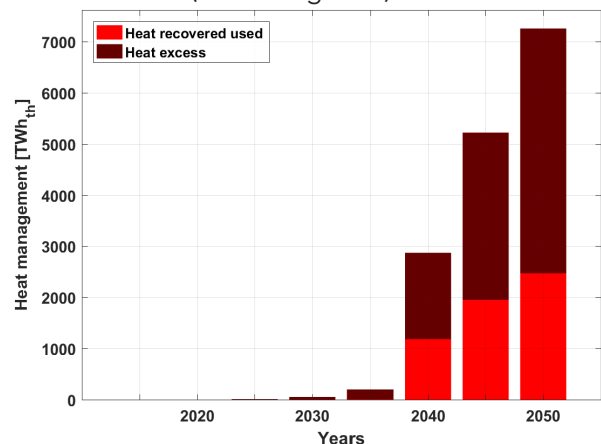
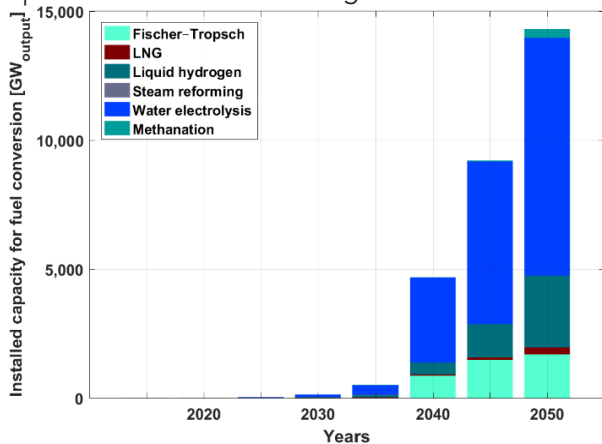


Abbildung ES-6: Installierte Kapazitäten der Brennstoffumwandlungstechnologien (links) und Wärmemanagement (rechts) durch die Energiewende von 2015 bis 2050.

Energiekosten und Investitionen

Die Umstellung auf ein System, das zu 100% auf erneuerbaren Energien aufbaut, führt langfristig zu stabilen Energiekosten in den verschiedenen Regionen der Welt über den gesamten Zeitraum der Energiewende hinweg. Die langfristigen Energiekosten für ein vollständig nachhaltiges globales Energiesystem bleiben während des Übergangs von 2015 bis 2050 stabil zwischen 50 und 57 €/MWh (Abbildung ES-7). Es entwickelt sich ein Trend, bei dem die Kosten zunehmend von den Kapitalkosten dominiert werden, und die Brennstoffkosten durch die Energiewende an

Bedeutung verlieren. Dies ermöglicht bis 2050 erhöhte Diversifizierung und eine Stärkung lokaler Energieunabhängigkeit in den verschiedenen Weltregionen. Die Investitionen im Energiesektor nehmen durch die Energiewende zu und sind auf eine Reihe von Technologien verteilt wobei besonders die Bereiche Solarenergie, Windenergie, Batterien, Wärmepumpen und die Umwandlung von synthetischen Brennstoffen im Fokus stehen (Abbildung ES-7). Die Investitionen sind auch in den drei großen Sektoren Strom, Wärme und Verkehr bis 2050 gleichermaßen verteilt.

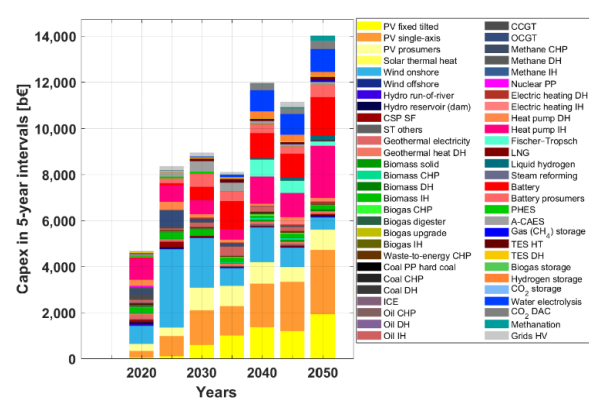
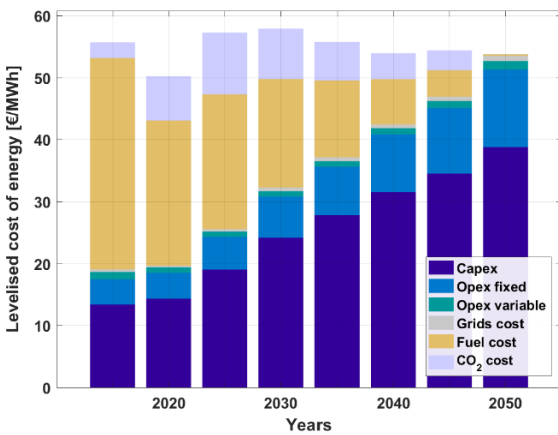


Abbildung ES-7: Angestufte Energiekosten (links) und Investitionen in fünfjährigen Intervallen (rechts) durch die Energiewende von 2015 bis 2050.

Reduzierung der Emissionen

Das wichtigste Ergebnis der globalen Energiewende besteht darin, dass die Treibhausgasemissionen in den Energiesektoren von fast 30.000 Tonnen CO₂-Äquivalent (MtCO₂eq) im Jahr 2015 bis 2050 auf Null gesenkt werden können (Abbildung ES-8, links).

Die verbleibenden gesamten Treibhausgasemissionen von rund 422 Gigatonnen CO₂-Äquivalent (GtCO₂eq) entsprechen den ehrgeizigen Zielen des Pariser Abkommens, den Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu begrenzen.

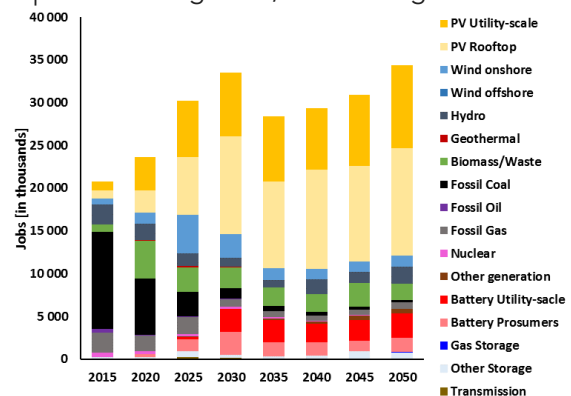
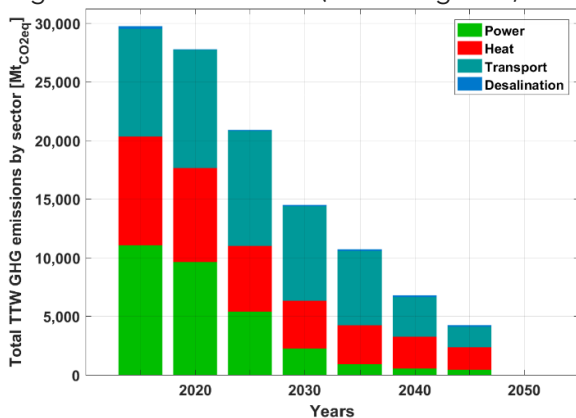


Abbildung ES-8: Sektorale Treibhausgasemissionen (links) Arbeitsplätze, die durch verschiedene Energieressourcen (rechts) während der Energiewende von 2015 bis 2050 geschaffen wurden

Schaffung von Arbeitsplätzen

Im Stromsektor werden in den verschiedenen Regionen der Welt rund 35 Millionen Arbeitsplätze im Bereich der Energiebereitstellung geschaffen (Abbildung ES-8 rechts). Die Beschäftigung verlagert sich vom Sektor fossiler Brennstoffe hin zu dem der erneuerbaren Energien und Energiespeicherung. Die meisten Arbeitsplätze im

Bereich der Energieerzeugung werden bis 2050 durch Solar PV und -batterien geschaffen. Arbeitsplätze, die in den Sektoren der fossilen Brennstoffe verloren gehen, werden netto mit 15 Millionen Arbeitsplätzen bis 2050 deutlich überkompensiert.

Politikempfehlungen

Um ein System mit 100% erneuerbaren Energien zu erreichen, müssen ehrgeizige Ziele festgelegt und durch stabile, langfristige und verlässliche Richtlinien unterstützt werden. Die politischen Rahmenbedingungen müssen auf der Grundlage der Subsidiarität lokal an die regionalen Gegebenheiten und Rahmenbedingungen angepasst werden. Die Energiewende sollte beschleunigt werden durch:

- Stromeinspeisegesetze, wie feste Einspeisevergütungen. Sie garantieren einen Mindestpreis pro Stromeinheit und fördern so lokale und regionale, private und öffentliche, kleine und mittlere Investitionen.
- Ausschreibungsverfahren, jedoch lediglich empfohlen für Projekte industriellen Maßstabs und Kapazitäten über 40 MW. Bei Projekten mit einer Kapazität von weniger als 40 MW sollten feste Einspeisetarife die dezentrale Erzeugung fördern.
- Steuerbefreiungen, direkte Subventionen und Privilegien für Technologien der Nutzung erneuerbarer Energien.
- Einführung einer CO₂-, Methan- und Radioaktivitätssteuer.
- Vorschriften, Regulierungen und Infrastrukturplanung, die die Effizienz von Gebäuden, Beleuchtung, Elektrogeräten, elektronischen Geräten und anderen Energieverbrauchern erhöhen.
- Kraft-Wärme-Kopplung (insbesondere Bioenergie und Power-to-Gas) mit vollständiger Wärmerückgewinnung.
- Angleichung der Wettbewerbsbedingungen der Energieversorgung durch Wegfall von fossilen und atomaren Subventionen und die Bepreisung negativer Externalitäten.
- Eine wesentliche Aufstockung der öffentlichen sowie privaten Mittel, insbesondere zur Finanzierung von Forschung und Bildung.
- Konsistente finanzielle Unterstützung durch lokale, nationale und regionale Regierungen und Institutionen.
- Divestment, Investitionen und Einrichtung neuer und innovativer Finanzierungsmöglichkeiten.
- Einbindung von Stakeholdern in allen Sektoren, um Chancen zu identifizieren, zu nutzen und Hindernisse während der Energiewende zu beseitigen.
- Kooperative Finanzierung und aktienbasierte Modelle in Kombination mit offenen und zugänglichen Online-Tools zur Überwachung der öffentlichen Ausgaben (z. B. partizipative Budgetierungsprogramme).

→ Weitere sektorale und regionale Ergebnisse der globalen Energiewende werden im Bericht detailliert dargestellt.