

## Factsheet Nr. 2 / 2011

# Transformation der Energiesysteme

Der WBGU zeigt in seinem Hauptgutachten „Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation“ (2011), dass eine globale Transformation der Energiesysteme, die es erlaubt, alle Menschen mit moderner Energie zu versorgen und gleichzeitig die durch die Menschen verursachte Klimaerwärmung auf 2°C zu begrenzen, technisch möglich und wirtschaftlich zu leisten ist.

### Die Botschaften des WBGU im Überblick

- › Eine klimaverträgliche Dekarbonisierung der Energiesysteme ist möglich und mit unterschiedlichen Technologiemixen erreichbar.
- › Die langfristigen volkswirtschaftlichen Kosten einer globalen Dekarbonisierung der Energiesysteme liegen bei wenigen Prozent des globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP).
- › Eine Transformation der Energiesysteme hat erhebliche Zusatznutzen, etwa im Gesundheitsbereich und bei der Versorgungssicherheit und reduziert langfristig Kosten für Brennstoffe sowie Anpassung an den Klimawandel.
- › Der WBGU empfiehlt eine Strategie, die primär auf Effizienzmaßnahmen sowie den Ausbau erneuerbarer Energien setzt.
- › Die nachhaltigen Potenziale erneuerbarer Energien reichen aus, um die Welt langfristig mit Energie zu versorgen.
- › Ein anspruchsvoller globaler Klimaschutz ist auch ohne Kernenergie möglich – der WBGU rät von der Kernenergienutzung ab. Dies darf aber nicht zu einer verstärkten Kohlenutzung führen.
- › Globale Institutionen, die erneuerbare Energien fördern und den Zugang zu nachhaltigen Energiedienstleistungen in Entwicklungsländern ermöglichen, sollten gestärkt werden.
- › Damit der Strukturwandel gelingt, müssen Bürger verstärkt in Entscheidungsprozesse einbezogen werden.

### Die Transformation der Energiesysteme erfolgt nicht aus Mangel an Ressourcen

Würden alle bekannten und geschätzten Reserven und Ressourcen fossiler Energieträger genutzt, entstünden dabei 100-mal mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen als bis 2050 in die Atmosphäre gelangen dürfen, wenn ein gefährlicher Klimawandel vermieden werden soll.

Soll die Klimaerwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von zwei Dritteln auf 2°C begrenzt werden, dürfen bis 2050 nicht mehr als 750 Mrd. t CO<sub>2</sub> aus fossilen Brennstoffen in die Atmosphäre gelangen. Allein die heute technisch und ökonomisch förderbaren Reserven fossiler Energieträger würden bei ihrer Verbrennung mehr als 7.000 Mrd. t CO<sub>2</sub> freisetzen, zählt man noch die

z. T. geschätzten Ressourcen und sonstigen Vorkommen hinzu, sind es noch zehnmal mehr. Für den Klimaschutz reicht es also nicht aus, auf eine Transformation der Energiesysteme zu warten, die in ferner Zukunft aus Mangel an Ressourcen ohnehin erfolgen muss. Es ist vielmehr notwendig, die Transformation umgehend zu beginnen.

#### Dekarbonisierung

Die Dekarbonisierung der Energiesysteme beschreibt den historisch beobachtbaren Trend des Übergangs von kohlenstoffreichen Energiequellen wie Biomasse (z.B. Holz) und Kohle zu weniger kohlenstoffintensi-

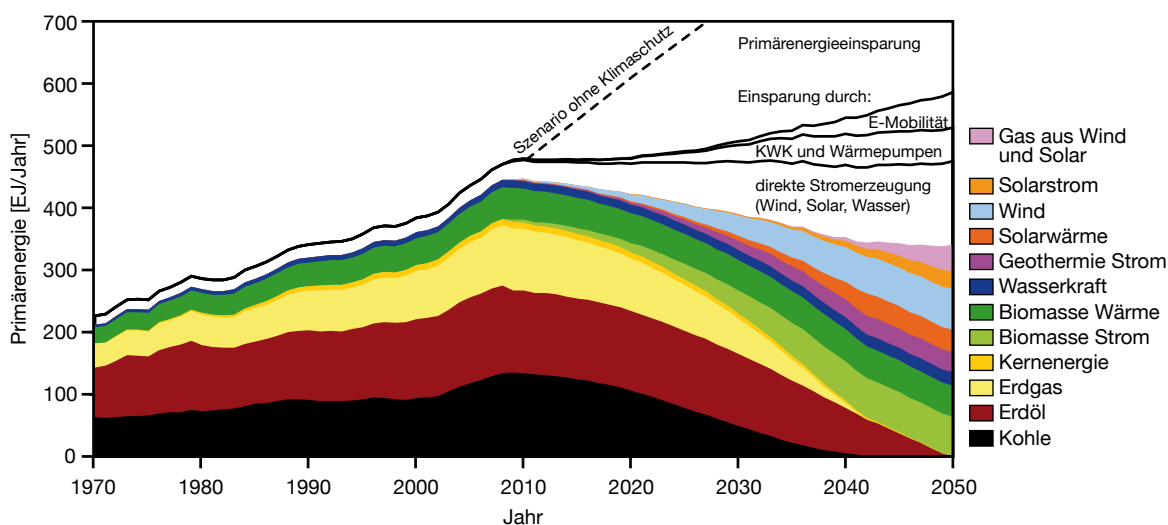
ven Energieträgern wie Öl und Gas, und zunehmend CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Energieträgern wie Solarenergie, Wind- und Wasserkraft. Oft sind die moderneren Energieträger auch universeller nutzbar (z.B. Strom), sicherer, sauberer und für den Endverbraucher komfortabler.

## Erneuerbare Energien reichen aus, um die Welt langfristig mit Energie zu versorgen

Nicht nur die theoretischen Potenziale, sondern auch die technischen und nachhaltig nutzbaren Potenziale erneuerbarer Energien übersteigen die derzeitige globale Energienachfrage bei weitem – die Möglichkeit einer globalen Vollversorgung mit erneuerbaren Energien ist also gegeben.

Abbildung 1 zeigt eine Vision für den Übergang in eine globale Vollversorgung mit erneuerbaren Energien, bei der die technische Machbarkeit im Vordergrund steht. Sollen bereits Mitte des Jahrhunderts genügend erneuerbare Energien für eine Vollversorgung zur Verfügung stehen, muss die Energieintensität der Wirtschaft deutlich sinken. Für die dargestellte Vision wird angenommen, dass der globale Wärme- und Kältebedarf durch Effizienzmaßnahmen um 1 % pro Jahr gesenkt werden

kann, und das Wachstum der Energienachfrage für den Verkehr sowie das globale Wachstum der Stromnachfrage nicht mehr als 1 % pro Jahr beträgt. Das größte nachhaltig nutzbare Potenzial hat langfristig die Solarenergie, die aber aufgrund ihrer derzeit noch sehr geringen Nutzung auch bei hohen Ausbauraten erst später relevante Anteile der globalen Energieversorgung stellen kann.



**Abbildung 1: Vision einer globalen regenerativen Energieversorgung bis 2050**

Basis für das Szenario sind fortgeschriebene aktuelle bzw. geschätzte Ausbauraten erneuerbarer Energien. Weiterhin wird den erneuerbaren Energien Priorität im Energiesystem eingeräumt, so dass die Nutzung bestehender konventioneller Energieträger verdrängt wird. Dabei liegt der Fokus nicht auf einer ökonomischen Optimierung des Technologiemixes. Weiterhin kann die Verfügbarkeit von Schlüsselwerkstoffen den tatsächlichen Transformationspfad beeinflussen.

Quelle: WBGU, Hauptgutachten 2011

## Intelligente Netze und Speicher machen Erneuerbare zu einer zuverlässigen Energiequelle

Viele erneuerbare Energien, wie etwa Windenergie oder Solarenergie, stehen nicht kontinuierlich und gleichmäßig zur Verfügung. Eine kontinentweite, intelligente Vernetzung von Strom und Gas sowie die Schaffung von Energiespeichern können diese Fluktuationen ausgleichen.

Ein transkontinentales Hochleistungstransportnetz für Strom und Gas ermöglicht den Transport von Energie aus Wind- und Solarkraftwerken von Standorten mit hohen Erträgen in die Verbrauchszentren und kann gleichzeitig für einen großflächigen Ausgleich lokaler Erzeugungsschwankungen sorgen. Auf diese Weise können in Europa etwa auch große Offshore-Windkapazitäten und Solarstrom aus dem Mittelmeerraum in die europäische Energieversorgung eingebunden werden und vorhandene Speichermöglichkeiten im Gasnetz bzw. Speicherwasserkraft in Skandinavien, in den Pyrenäen und in

den Alpen erschlossen werden. Langfristige Schwankungen, etwa eine wochenlange Windflaute, können mit Hilfe so genannter Backup-Kraftwerke ausgeglichen werden. Dies sind etwa schnell reagierende Gasturbinenkraftwerke, aber auch virtuelle Kraftwerke aus synchron gesteuerten dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Als Energieträger kann zunächst Biogas verwendet werden, perspektivisch ist auch eine Nutzung von Methan denkbar, das mit Hilfe überschüssigen Stroms aus Wind und Solarenergie in Zeiträumen mit hoher Energieverfügbarkeit produziert wird.

### Reserven, Ressourcen

In fossilen Energieträgern ist Energie gespeichert: Kohle, Öl und Erdgas sind in vorgeschichtlicher Zeit aus pflanzlichen und tierischen Überresten entstanden, die gespeicherte Energie stammt also aus der damaligen Sonneneinstrahlung. Bei fossilen Energieträgern wird in der Regel die Gesamtmenge der gespeicherten Energie betrachtet, nämlich die Reserven (bekannte, und unter heutigen Bedingungen technisch und ökonomisch förderbare Vorkommen) und die Ressourcen (nachgewiesene bzw. geschätzte Vorkommen, die als zukünftig förderbar gelten).

### Potenziale

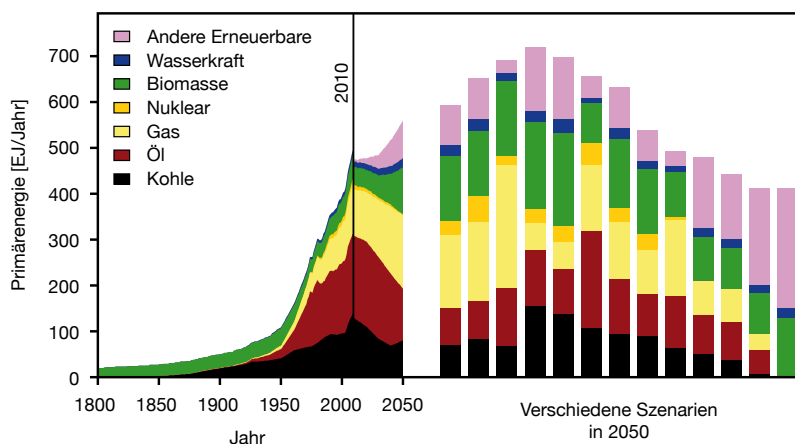
Erneuerbare Energien sind hingegen nicht durch ihre Gesamtmenge begrenzt, sondern durch die Energien, die pro Zeiteinheit zur Verfügung stehen, die sogenannten Potenziale. Diese haben theoretische Obergrenzen (etwa die auf einer Fläche pro Zeiteinheit einfallende Solarstrahlung) sowie Obergrenzen bei der technischen Nutzbarmachung. Für den WBGU relevant ist besonders das nachhaltig nutzbare Potenzial, bei dem nicht nur technische, sondern auch ökologische und sozioökonomische Beschränkungen der Nutzbarkeit erneuerbarer Energiequellen berücksichtigt werden.

## Szenarien für die Energietransformation

Transformative Szenarien aus der Literatur zeigen, dass es möglich ist, das globale Energiesystem so zu transformieren, dass eine Erwärmung von mehr als 2°C vermieden werden kann. Eine Schlüsselrolle kommt der Energieeffizienz und den erneuerbaren Energien zu.

Der WBGU hat eine Reihe transformativer Energieszenarien aus der Literatur analysiert. Allen Szenarien ist gemeinsam, dass die Nachfrage nach Energie nur moderat wächst: von heute ca. 470 EJ steigt sie auf nicht mehr als 700 EJ im Jahr 2050, in einigen Szenarien fällt sie sogar auf 400 EJ. Dies zeigt die hohe Bedeutung von Effizienzmaßnahmen für die Transformation. Gleichzeitig wächst die Bedeutung netzgebundener Energieformen wie Strom und Gas. Ausnahmslos alle Szenarien zeigen einen ambitionierten Ausbau erneuerbarer Energien mit durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten von mehr als 3% oder sogar 4% zwischen 2010 und 2050. Darüber hinaus zeigen die Szenarien jedoch sehr unterschiedliche Technologiemixe – es gibt also einen

deutlichen Spielraum für politische und gesellschaftliche Technologieentscheidungen bei der Transformation der Energiesysteme in Richtung Klimaschutz. In Szenarien mit geringerer Energienachfrage lassen sich höhere Anteile erneuerbarer Energien erzielen, und es entstehen Möglichkeiten, auf Kernenergie zu verzichten und die Nutzung fossiler Energien mit CCS gering zu halten. Der WBGU rät von der Kernenergienutzung wegen hoher externer Kosten ab, insbesondere wegen des Risikos schwerster Schadensfälle, der ungeklärten Endlagerungsproblematik und der Möglichkeit unkontrollierter Proliferation. CCS ist für jene Staaten von Bedeutung, die weiterhin fossile Energieträger nutzen.



### Abbildung 2: Übersicht transformativer Szenarien

Gezeigt ist ein Überblick über den Energiemix verschiedener globaler Klimaschutzszenarien aus der Fachliteratur. Auf der linken Seite ist bis 2008 der reale Energiemix gezeigt, ab 2010 ein Klimaschutzszenario. Rechts ist der Energiemix des Jahres 2050 für weitere Szenarien dargestellt. Diese Szenarien würden jeweils eine Beschränkung der anthropogenen Klimaerwärmung auf 2°C ermöglichen. Allen ist gemeinsam, dass die Energienachfrage nur moderat steigt und erneuerbare Energien stark ausgebaut werden. Etwa zwei Drittel der Szenarien setzen die Nutzung von CCS voraus, einige Szenarien kommen sowohl ohne Kernenergie als auch ohne CCS aus. Ganz rechts findet sich zum Vergleich die WBGU-Vision aus Abbildung 1. Die gezeigten Szenarien sind im WBGU-Hauptgutachten zur Transformation erläutert. Quelle: WBGU, Hauptgutachten 2011

### Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS)

Eine technische Option, um Zeit für den Umbau zu emissionsfreien Energiequellen zu gewinnen und dabei zumindest Teile der großen Vorräte an fossilen Energieträgern zu nutzen, ist die technische Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus Abgasen stationärer Anlagen sowie die anschließende Lagerung von komprimiertem CO<sub>2</sub> in geologischen Formationen (Carbon Capture and Storage, CCS). Die Technologie ist jedoch noch nicht in großem Maßstab erprobt und wirft verschiedene Probleme auf. Sie erhöht notwendige Investitionen und laufende Kosten fossiler Kraftwerke und setzt deren Effizienz herab. Auch ist es nicht möglich, das CO<sub>2</sub> zu 100% aus dem Abgasstrom zu entfernen. Von besonderer Bedeutung für den langfristigen Klimaschutz ist das Risiko eines schleichenden Entweichens des eingelagerten CO<sub>2</sub>. Der WBGU empfiehlt daher, nur solche Speicher zu nutzen, bei denen sichergestellt werden kann, dass die Rückhaltezeit mindestens 10.000 Jahre beträgt. In Verbindung mit der Nutzung von Bioenergie wird CCS als Option diskutiert, der Atmosphäre aktiv CO<sub>2</sub> zu entziehen. Diese Möglichkeit ist allerdings durch die Menge an nachhaltig nutzbarer Biomasse begrenzt.

## Kosten, Finanzierung und Rahmenbedingungen der Transformation

Die Transformation der Energiesysteme kann nur gelingen, wenn für sie ein förderliches Umfeld geschaffen wird, bei dem erstens die wahren Kosten des heutigen, emissionsintensiven Energiesystems deutlich werden, zweitens neue Technologien gezielt gefördert werden und drittens Möglichkeiten gefunden werden, die hohen Anfangsinvestitionen rentabel zu machen.

Eine globale Dekarbonisierung der Energiesysteme ist nicht nur technisch sondern auch wirtschaftlich möglich. Die langfristigen volkswirtschaftlichen Kosten einer solchen Transformation liegen bei wenigen Prozent des globalen Bruttoinlandsprodukts. Es sind jedoch erhebliche zusätzliche Investitionen in der Größenordnung von mehreren hundert Mrd. US-\$ pro Jahr notwendig. Zum Vergleich: Auch heutige schädliche Subventionen fossiler Energieträger liegen im dreistelligen Milliardenbereich. Ziel staatlicher Politik sollte es daher sein, bestehende Fehlanreize und Investitionsbarrieren abzubauen

sowie Investitionen in klimaverträgliche Technologien und Infrastruktur attraktiver zu machen, etwa durch die Verringerung von Risiken. Dafür sind langfristige, stabile Rahmenbedingungen mit ambitionierten Zielen notwendig, etwa im Rahmen eines Klimaschutzgesetzes oder einer Dekarbonisierungsstrategie. Eine ambitionierte Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie der Abbau von Subventionen fossiler Energieträger haben eine große Steuerungswirkung und können zusätzliche Finanzmittel erschließen. Neue Geschäftsmodelle für die Transformation sind zu entwickeln.

## Zusatznutzen der Transformation der Energiesysteme

Eine globale Transformation der Energiesysteme, wie sie der WBGU vorschlägt, würde über den Klimaschutz hinaus auch weitere Zusatznutzen bringen.

Rund 3 Mrd. Menschen sind noch immer von einer existenziellen Grundversorgung mit modernen Energiedienstleistungen ausgeschlossen und kochen z.B. mit festen Brennstoffen. Die dadurch verursachten gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Todesfälle könnten durch die Transformation der Energiesysteme vermieden

werden. Darüber hinaus könnte eine Abkehr von fossilen Energieträgern einen maßgeblichen Beitrag zur Luftreinhaltung leisten. Weiterhin würde die Versorgungssicherheit verbessert, und langfristige Kosten für Brennstoffe sowie für die Anpassung an den Klimawandel würden sinken.

## Internationale Kooperation für die Transformation der Energiesysteme

Der Zugang zu sicherer, sauberer und bezahlbarer Energie für alle Menschen weltweit und eine gleichzeitige Dekarbonisierung der Energiesysteme kann nur mit einer verstärkten internationalen Kooperation gelingen.

Die wichtigsten Ziele der globalen Transformation der Energienutzung sind die Begrenzung der globalen Energienachfrage, der Zugang zu moderner Energie für alle Menschen, die Dekarbonisierung der Energieversorgung sowie die Einführung neuer klimaverträglicher Technologien im Verkehr, bei Gebäuden und in der Industrie. Internationale Kooperation ist notwendig, um die Entwicklung von Schlüsseltechnologien zu beschleunigen und eine globale Diffusion von Technologien zu erleichtern. Die einflussreiche Internationale Energieagentur (IEA) sollte sich stärker in Richtung nachhaltiger Energienutzung und -systeme ausrichten und offener für Entwicklungs- und Schwellenländer werden. Die 2009

neu gegründete IRENA kann zukünftig eine wichtige Aufgabe bei der Verbreitung erneuerbarer Energien einnehmen. Eine Einigung in der internationalen Klimapolitik könnte entscheidende Technologie- und Finanztransfers aus Industrieländern für die Transformation in Entwicklungs- und Schwellenländern mobilisieren. Einspeisevergütungen für erneuerbare Energien sowie die Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sollten weltweite Verbreitung finden. Insgesamt sollten bei der internationalen Kooperation weniger Projekte im Fokus stehen als vielmehr systemische Änderungen. Es geht um die gemeinsame Erarbeitung von Strategien für eine klimaverträgliche Entwicklung und „grünes“ Wachstum.

### Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

Der WBGU ist ein unabhängiges wissenschaftliches Beratungsgremium der Bundesregierung, das Handlungs- und Forschungsempfehlungen für die Politik erarbeitet. Das Hauptgutachten „Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation“ steht auf der WBGU-Website zum Download bereit.

Geschäftsstelle WBGU | Telefon: (030) 26 39 48-0  
Luisenstraße 46 | E-Mail: [wbg@wbgu.de](mailto:wbg@wbgu.de)  
10117 Berlin | Internet: [www.wbgu.de](http://www.wbgu.de)

© 2011 WBGU

ISBN 978-3-936191-52-3

