

## Kosten- und Modellvergleich langfristiger Klimaschutzpfade (bis 2050)

### Kernthesen zum 2. Zwischenbericht des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens (FKZ 3708 49 104) im Auftrag des Umweltbundesamtes

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Stefan Lechtenböhmer, Antoine Durand, Jochen Luhmann, Sascha Samadi, Clemens Schneider

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Brigitte Knopf, Eva Schmid

Das vorliegende Thesenpapier stellt zunächst den Hintergrund des laufenden Forschungsprojekts „Kosten- und Modellvergleich langfristiger Klimaschutzpfade“ dar, das gemeinsam vom Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie und dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung bearbeitet wird.

Der zweite Abschnitt enthält wichtige Zwischenergebnisse in Thesenform. Basis des Papiers ist der 2. Zwischenbericht des o.g. Forschungsprojekts, der Zwischenergebnisse aus der Analyse dreier verschiedener Klimaschutzpfade für Deutschland bis 2050 darlegt.

## 1 Einleitung und Hintergrund

In der Klimaschutzpolitik standen bisher vor allem kurz- und mittelfristige Emissionsminderungsziele im Vordergrund. Internationale Verhandlungen zum Klimaschutzregime, auf EU-Ebene und in der nationalen Klimapolitik konzentrierten sich auf die Verpflichtungsperioden des Kyoto-Protokolls (2008 bis 2012) und sein auszuhandelndes Nachfolgeabkommen (2013 bis 2020).

Erfolgsmaßstab für die Klimapolitik ist jedoch das langfristige Ziel, eine Gefährdung des Lebens auf der Erde einzudämmen. So wurde es 1992 in der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen festgeschrieben. Das gelingt nur, wenn die Emissionen alsbald und deutlich zurückgefahren werden – mit dem klaren Ziel, bis zur Mitte dieses Jahrhunderts in den Industrieländern nur noch einen Bruchteil der heutigen Treibhausgasemissionen zu verursachen.

Im Jahr 1996 leitete der Umweltministerrat der Europäischen Gemeinschaften aus dem zweiten Evaluierungsbereich des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen

(Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) die Auffassung ab, „dass die globalen Durchschnittstemperaturen nicht um mehr als zwei Grad gegenüber den Temperaturen in der Zeit vor der Industrialisierung steigen dürfen“<sup>1</sup>. Seither ist dieses Zwei-Grad-Ziel zu einem breiten politischen Konsens geworden, der neben der Europäischen Union auch von den G8 (der Gruppe der acht größten Industrienationen der Welt) mitgetragen wird und Eingang in die Schlusserklärung zur jüngsten Kopenhagener Vertragsstaatenkonferenz der UN-Rahmenkonvention zum Klimawandel gefunden hat.

Nach dem Grundsatz gemeinsamer, aber differenzierter Verantwortung der internationalen Staatengemeinschaft übersetzt die EU dieses Zwei-Grad-Ziel in Anlehnung an den vierten Evaluierungsbericht des IPCC in die Leitlinie, dass Industrieländer ihre Emissionen bis 2020 um 25 bis 40% und bis 2050 um 80 bis 95%, jeweils gegenüber 1990, verringern sollten<sup>2</sup>.

Das noch bis Ende 2010 laufende Forschungsprojekt „Kosten- und Modellvergleich langfristiger Klimaschutzpfade (bis 2050)“ analysiert und vergleicht verschiedene Klimaschutzszenarien für Deutschland auf ihren langfristigen Emissionsminderungsbeitrag und im Hinblick auf ihre ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen. Für Analyse und Vergleich wird das gekoppelte detaillierte makroökonomische Wachstums- und Energiesystemmodell REMIND-D des Potsdam-Instituts mit dem technologisch differenzierteren Energienachfragemodell DEESY des Wuppertal Instituts kombiniert.

Dieses Thesenpapier zum 2. Zwischenbericht dokumentiert die Ergebnisse erster harmonisierter Modellläufe mit REMIND-D und DEESY für drei ausgewählte Langfristszenarien mit einem Zeithorizont bis 2050 für Deutschland. Diese ersten Ergebnisse sind die Basis für weitere Verbesserungen und Harmonisierungen der Modellrechnungen sowie für zusätzliche Sensitivitätsanalysen.

Es wurden **drei grundsätzlich verschiedene Klimaschutzszenarien** analysiert, um Emissionsminderungen von 40% bis zum Jahr 2020 und von 85% bis zum Jahr 2050 in Deutschland zu erreichen.

### **Szenario 1: Moderate Effizienzsteigerung mit angebotsseitigem Strukturwandel**

Szenario 1 geht davon aus, dass die nachfrageseitige Energieeffizienz zwar gesteigert wird, die Effizienzsteigerungen und Verbrauchsminderungen hier aber begrenzt bleiben. Die Strom- und Wärmeerzeugung in fossilen und nuklearen Kraftwerken läuft aus und wird durch inländische und importierte erneuerbare Energie aus Wind und Biomasse sowie Solarenergie ersetzt. In diesem Szenario wird davon

---

<sup>1</sup> PRES/96/188, Pressemitteilung der Europäischen Gemeinschaften vom 26. Juni 1996 anlässlich der 1939. Tagung des Umweltrates am 25. und 26. JUNI 1996 in Luxemburg

<sup>2</sup> Schlussfolgerungen des Rates zur weiteren Entwicklung der EU-Position zu einem umfassenden Klimaschutzabkommen ab dem Jahr 2012 (Beitrag für das Frühjahrstreffen des Europäischen Rates), 2928. Treffen des Umweltrates am 2. März 2009 in Brüssel

ausgegangen, dass die Technik der Kohlenstoffabscheidung und -Einlagerung (engl. carbon capture and storage, kurz CCS) nicht zur Verfügung steht.

### **Szenario 2: Moderate Effizienzsteigerung mit strukturkonservativer Angebotsseite**

Szenario 2 skizziert eine Entwicklung, bei der weiterhin auf großtechnische fossile Energieerzeugung gesetzt wird. In dieser Strategie wird als zusätzliche Klimaschutzoption die Kohlenstoffabscheidung genutzt, wobei die Erschließbarkeit dieser Option maßgeblich vom verfügbaren Speichervolumen für CCS abhängt.

### **Szenario 3: Hohe Effizienzsteigerung mit angebotsseitigem Strukturwandel**

Im Szenario 3 wird davon ausgegangen, dass eine sehr deutliche Steigerungsrate der Energieeffizienz erreicht wird, die etwa doppelt so hoch ist wie die Steigerungsrate der vergangenen Jahrzehnte. Parallel findet ein Strukturwandel in der Stromerzeugung statt.

Der folgende Abschnitt fasst die wichtigsten bereits jetzt erkennbaren Ergebnisse der aus den beschriebenen Strategien abgeleiteten Szenariountersuchungen in sechs Kernthesen zusammen.

## **2 Zentrale Ergebnisse der ersten Szenarioanalysen**

### **These 1:**

**Eine territoriale Verringerung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland bis 2050 um 85% gegenüber 1990 ist anspruchsvoll, aber auch mit der bestehenden gesetzlichen Regelung zum Atomausstieg realisierbar.**

Eine **Reduktion der energiebedingten Emissionen um 85%** gegenüber 1990 ist in Deutschland territorial **möglich**. Dabei wurde der Atomausstieg gemäß derzeit geltendem Atomgesetz simuliert, d.h. bis zum Jahr 2023 läuft die nukleare Stromerzeugung in Deutschland in allen Szenarien aus.

- Über den Zeitraum 2010 bis 2050 können die kumulierten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland auf ca. 17,7 Mrd. t begrenzt werden. Bei einem kontinuierlichen Emissionsrückgang wird somit im Jahr 2050 eine Minderung des jährlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um etwa 85% gegenüber dem Jahr 1990 erreicht sein.
- Die – vorläufigen – Szenarioergebnisse zeigen, dass für eine so starke Emissionsminderung alle verfügbaren (von den Modellen zugelassenen) technischen Strategieelemente genutzt werden müssen. Dies führt wiederum dazu, dass sich die untersuchten Strategievarianten im Stromsektor bis 2030 nur dadurch unterscheiden, dass im Szenario 2 (strukturkonservatives Szenario) mehr Strom eingesetzt wird und dafür zusätzlich Erdgaskraftwerke mit Kohlenstoffabscheidung betrieben werden.

- Diese inländische Emissionsreduktion wird ggf. nicht ausreichen, wenn es zu einer internationalen Aufteilung des noch verfügbaren globalen Emissionsbudgets nach einer Pro-Kopf-Kalkulation kommen sollte. Fehlende Emissionsrechte<sup>3</sup> müssten dann über entsprechende Mechanismen aus dem Ausland, d.h. vor allem aus den Entwicklungsländern, importiert werden.

#### **These 2:**

**Eine deutliche Energieeffizienzsteigerung auf der Nachfrageseite ist in allen untersuchten Strategien von zentraler Bedeutung. Wenn es gelingt, die Steigerungsrate der Energieeffizienz bis 2050 zu verdoppeln, können gegenüber einem Klimaschutzszenario mit geringerer Effizienzsteigerung die Kosten für Klimaschutz<sup>4</sup> gesenkt werden.**

Als wichtigste Strategien zum Klimaschutz erweisen sich in den Szenarienvergleichen der frühzeitige Ausbau der erneuerbaren Energien vor allem im Stromsektor und Energieeffizienzsteigerungen in allen Nachfragesektoren.

- Die Modellsimulation der nachfrageseitigen Effizienzsteigerungen führt derzeit noch zu unterschiedlichen Strategien in den beiden verwendeten Modellen. REMIND tendiert zu höheren Stromanteilen im Endenergie-Mix, das DEESY-Modell dagegen erwartet bei hohen Effizienzsteigerungen nur leichte Anteilsgewinne für Stromanwendungen.
- Auch im Verkehrsbereich unterschieden sich beide Modelle zum jetzigen Projektstand noch in ihren Strategien. Im Modell DEESY erfolgt eine Emissionsminderung im Verkehrssektor z.B. durch den verstärkten Übergang zu kraftstoffsparenden Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. In REMIND findet die Dekarbonisierung im Transportsektor graduell statt, beginnend mit einer Nutzung von Hybridfahrzeugen. Bei einer zunehmenden Dekarbonisierung des Stroms setzen sich plug-in-Hybridfahrzeuge und nach und nach auch Elektroautos durch.

#### **These 3:**

**Alle untersuchten langfristigen Klimaschutzstrategien setzen in der Modellsimulation auf einen forcierten Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung auf mindestens 40 % im Jahr 2020 und damit auf einen stärkeren Zuwachs als bisher politisch (beispielsweise im Erneuerbare-Energien-Gesetz) vorgesehen.**

---

<sup>3</sup> Zum Vergleich: Bei einer Zuteilung der Emissionsrechte aus dem Gesamtbudget, das zur Einhaltung des Zwei-Grad-Ziels noch emittiert werden dürfte, würde Deutschland bei einer Pro-Kopf-Verteilung ein Budget von etwa 9-11 Mrd. t CO<sub>2</sub> erhalten, bei einer Verteilung nach dem "Contraction und Convergence"-Ansatz wären es ca. 18 Mrd. t CO<sub>2</sub>.

<sup>4</sup> Hier sind allerdings die möglichen Schadenskosten des Klimawandels, die vor allem in Szenarien ohne weitreichende Emissionsminderungen zu erwarten wären, nicht berücksichtigt.

Alle drei untersuchten Szenarien für die Energieversorgung zeigen bis 2030 eine **robuste Strategie der Veränderung der Stromproduktion:**

- Ein stärker forcierter Ausbau der erneuerbaren Energien ist nötig, um die vorgegebenen Emissionsminderungsziele in den Jahren 2020 (-40 %) und 2050 (-85 %) zu erreichen. Der Anteil der erneuerbaren Energien muss in allen drei Szenarien bis 2020 auf mindestens 40 % erhöht werden. Die vorhandenen Potenziale der erneuerbaren Energien in Deutschland werden in allen drei Szenarien langfristig weitgehend ausgeschöpft.
- Stromimporte, z.B. von Offshore-Windstrom aus Nord- und Ostsee oder aus anderen erneuerbaren Stromquellen (z.B. DESERTEC), können den Ausbau der heimischen Erzeugung mittelfristig ergänzen.

**These 4:**

**Konventionelle Kraftwerke ohne Kohlenstoffabscheidung (CCS) werden in keinem der untersuchten Szenarien mehr gebaut.**

In keinem der drei Szenarien wird in konventionelle Kraftwerke (ohne CCS) investiert.

- Die durch konventionelle fossile Kraftwerke über lange Zeiträume fixierten Emissionsmengen sind nicht mit den anspruchsvollen Minderungserfordernissen der Klimaschutzenszenarien vereinbar und würden letztlich dazu führen, dass die Kraftwerke vorzeitig stillzulegen wären oder dass die Klimaschutzziele verfehlt würden.
- Im Szenario 2 (strukturkonservatives Szenario) wird lediglich die Erdgas-Stromerzeugung mit CCS ausgebaut. Zu Neubauten von Kohlekraftwerken kommt es nicht.

**These 5:**

**In Klimaschutzenszenarien mit weitgehender Dekarbonisierung des Energiesektors sind CO<sub>2</sub>-Speicher eine knappe Ressource. Daher wird die Technik der Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) in diesen Szenarien ausschließlich zur Abscheidung von Kohlenstoff aus Biomasse und aus Erdgaskraftwerken genutzt und wird zum größeren Teil erst für zukünftig (d.h. nach 2050) zu erbringende Emissionsminderungen eingesetzt<sup>5</sup>.**

Unterstellt man, dass die **CCS-Technologie** mittelfristig technisch zur Verfügung steht, wäre CCS – nach dem Ergebnis der Modellläufe – vor allem eine Option für die Zeit nach 2050. Der Großteil der nutzbaren Speicherkapazitäten würde erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts in Anspruch genommen. In der ersten Jahrhunderthälfte müssten allerdings schon zentrale Investitionen (insbesondere in Infrastrukturen) getätigt werden. Die Nutzung der CCS-Technologie im Rahmen einer Strategie bis 2050 hängt dabei vor allem von den vorhandenen Speicherpotentialen ab.

---

<sup>5</sup> Dabei wird eine mögliche Kohlenstoffabscheidung aus Industrieprozessen wie z.B. der Stahlerzeugung im REMIND-Modell bislang nicht abgebildet.

- CCS wird zum einen bei der Erzeugung von Kraftstoff aus Biomasse (BTL) genutzt. Dabei kann das durch die Biomasse aus der Atmosphäre aufgenommene Kohlendioxid abgeschieden und eingelagert werden. Somit kann der Atmosphäre Kohlendioxid entzogen werden und es entstehen so genannte ‚negative Emissionen‘. Zum anderen wird die CCS-Technologie zum Ausbau von Erdgas-Kraftwerken eingesetzt, die aufgrund ihrer Regelbarkeit auch gut geeignet sind, um den Ausbau der erneuerbaren Energien zu flankieren. Die Nutzung von CCS in Verbindung mit Stein- oder Braunkohleverstromung ist nur unter der Annahme eines wesentlich erhöhten CCS-Speicherpotentials oder bei einem deutlich geringeren Treibhausgas-Minderungsziel sinnvoll, da dann die verfügbaren CO<sub>2</sub>-Speicherpotentiale weniger „knapp“ wären.
- Der Großteil der CO<sub>2</sub>-Speicherung wird erst nach 2050 relevant. Bis 2050 bleiben die CO<sub>2</sub>-Einlagerungen mit 1,8 Mrd. t CO<sub>2</sub> unter dem konservativ geschätzten Speichervolumen von 5,3 Mrd. t CO<sub>2</sub> für Deutschland. Legt man eine maximale Injektionsrate von ca. 75 Mio. t pro Jahr zugrunde, so verringert sich das genutzte Speichervolumen bis 2050 nochmals auf ca. 1 Mrd. t CO<sub>2</sub> eingelagerten Kohlenstoff.

#### **These 6:**

**Eine 85-prozentige Reduktion der energiebedingten Emissionen gegenüber 1990 hat sich im Modell als technisch machbar herausgestellt. Allerdings kommen die durchgeführten Modellrechnungen zu dem Ergebnis, dass die Grenzkosten der Emissionsvermeidung im Bereich des 85%-Zieles stark ansteigen, falls das Ziel ausschließlich durch Emissionsminderungen im eigenen Land erreicht wird. Diese hohen Grenzkosten sprechen für die Einbettung nationaler Emissionsminderungsstrategien in einen internationalen Emissionshandel – denn dadurch wäre eine deutliche Kostensenkung möglich.**

Es gibt zwei Extreme der Betrachtungsweise, wie sich Deutschland in den internationalen Kontext einbetten kann. Die eine Betrachtungsweise geht, wie in den hier beschriebenen Szenarien vorgesehen, davon aus, dass die erforderliche Emissionsreduktion ausschließlich territorial erbracht wird. Die andere Betrachtungsweise geht von einem globalen Emissionshandel aus, bei dem die Emissionen dort reduziert werden, wo es am günstigsten ist. Deutschland könnte dann – zumindest für eine Übergangszeit, in der in anderen Ländern noch kostengünstige Minderungsoptionen bestehen – einen Teil seiner Verpflichtungen zur Emissionsreduktion über den Zukauf von Emissionszertifikaten realisieren statt durch physische Emissionsminderungen auf dem eigenen Territorium.

- Bei der territorialen Betrachtungsweise stellt das Szenario 1 „moderate Effizienzsteigerung mit angebotsseitigem Strukturwandel“ einen Basisfall des Klimaschutzszenarios dar, das weder auf CCS noch auf eine sehr dynamische Erschließung der Energieeffizienzpotentiale setzt. Gegenüber einem „business-as-usual“-Szenario mit minimalen Klimaschutzzielen wächst das Bruttoinlandsprodukt (BIP) deutlich langsamer: das BIP, das im Basisszenario in 2050 erreicht wird, wird im ‚business-as-usual‘-Fall mit höherem Emissionsbudget bereits im Jahr 2040 erzielt. Diese Auswirkungen auf die Wirtschaftsleistung erklären sich aus der Logik des Modells: Stehen keine ausreichenden technischen Minderungsoptionen zur Verfügung, reduziert

das Modell die Wirtschaftsleistung, um das vorgegebene Emissionsbudget nicht zu überschreiten. Weiterhin werden mögliche Kosteneinsparungen durch vermiedene Klimaschäden und positive Wachstumswirkungen durch eine Vorreiterrolle beim Klimaschutz<sup>6</sup> nicht mit berücksichtigt. Im Vergleich zu diesem Basis-Klimaschutzszenario können diese reduzierten Wachstumsraten in den Szenarien 1 und 2 deutlich gemildert werden, wenn es gelingt die Energieeffizienz vor allem auf der Nachfrageseite deutlich zu verbessern oder wenn die CCS-Technologie zur Kohlenstoffabscheidung in signifikantem Ausmaß und zu den im Szenario angenommenen Konditionen zur Verfügung stehen sollte (s.o.). Die zusätzliche Option einer Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke von 10 oder auch 20 Jahren hat dagegen nur sehr geringfügige Auswirkungen auf das BIP-Wachstum.

- Im Vergleich zu einem Szenario für globalen Klimaschutz mit einem globalen Emissionshandel könnte die in den drei betrachteten Szenarien angenommene rein territoriale Emissionsreduktion für Deutschland zu höheren volkswirtschaftlichen Belastungen führen – vor allem, wenn global die CCS-Technologie in größerem Umfang genutzt werden könnte. Bei einem globalen Emissionshandel würde in Deutschland weniger territoriale Emissionsreduktion als in den oben beschriebenen Szenarien stattfinden und die zusätzlich benötigte Emissionsreduktion über Zertifikate dazu gekauft werden. Auf diese Weise könnte die Verringerung der Wachstumsrate durch Klimaschutz in Deutschland wesentlich niedriger liegen als in den drei betrachteten Szenarien.

---

<sup>6</sup> Eine Vorreiterrolle beim Klimaschutz fördert im Inland die Entwicklung und Markteinführung innovativer Klimaschutztechniken, zum Beispiel bei den erneuerbaren Energien oder energieeffizienten Produkten und Produktionsverfahren. Dadurch entstehen Wettbewerbsvorsprünge für inländische Unternehmen - so genannte first mover advantages - die über steigende Exporte Wirtschaftswachstum und Beschäftigung fördern.