

Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland

Modul 10.a:

Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 % bis 2050 (Kurzfassung)

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie



AutorInnen/Reviewer

AutorInnen: Benjamin Pfluger, Tobias Fleiter, Lukas Kranzl, Michael Hartner, Wolfgang Schade, Anna Hennecke, Horst Fehrenbach, Lars Brischke, Bernd Tersteegen, Frank Sensfuß, Jan Steinbach

Reviewer: Christoph Maurer, Bernd Franke, Mario Ragwitz, Martin Pehnt, Martin Wietschel

Impressum

Benjamin Pfluger	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) Breslauer Straße 48 76139 Karlsruhe Benjamin.Pfluger@isi.fraunhofer.de
Bernd Tersteegen	Consentec GmbH Grüner Weg 1 52070 Aachen tersteegen@consentec.de
Bernd Franke	ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH Wilckensstraße 3 D-69120 Heidelberg, Deutschland bernd.franke@ifeu.de
Hintergrundbild Deckblatt	© shutterstock.com/vs148
Veröffentlicht	Mai 2017

Hintergrund und Vorgehen

Die Begrenzung des von Menschen verursachten Klimawandels zählt zu den zentralen umweltpolitischen Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Es besteht weitgehender Konsens, dass sie eine massive Minderung der Treibhausgasemissionen erfordert. Im Energiekonzept der Bundesregierung wurde bereits im Jahr 2010 ein Pfad für die zukünftige Reduktion der Treibhausgasemissionen vorgegeben. Die Zielformulierung spannt für das Jahr 2050 eine Bandbreite auf, die noch offenlässt, ob eine Dekarbonisierung um 80 % oder 95 % bis 2050 (im Vergleich zum Jahr 1990) angestrebt wird.

Für die untere Grenze dieses Korridors werden heute im wissenschaftlichen und politischen Kontext bereits konkrete Umsetzungsmöglichkeiten diskutiert und es liegen zahlreiche, technisch detaillierte Studien vor, die Wege zur Erreichung einer 80 %-igen Dekarbonisierung untersuchen. Studien zur (nahezu) vollständigen Dekarbonisierung, also der oberen Grenze des Korridors, sind hingegen meistens technisch abstrakter und beschäftigen sich eher mit grundlegenden Optionen und Konzepten.¹

In der Langfassung dieses Papiers werden mögliche Optionen und Strategien für eine 95 %ige Treibhausgasreduktion systematisiert. Der Fokus der Betrachtungen liegt auf Deutschland, wobei die Berührungspunkte mit den internationalen Entwicklungen in vielen Bereichen großen Einfluss haben und einige zentrale Erkenntnisse für andere Länder in gleicher oder ähnlicher Weise gelten werden. Ziel der Analysen ist nicht, einen konkreten Pfad in Form eines Szenarios darzustellen, sondern Erkenntnisse über den „Lösungsraum“ abzuleiten; in noch ausstehenden Arbeiten werden modellbasierte Analysen diese Erkenntnisse vertiefen.

Die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt. Im ersten Abschnitt werden die Schlussfolgerungen bezüglich der übergeordneten und sektoralen Randbedingungen dargestellt, welche für einen 95 %-Pfad gelten; diese Bedingungen sind unabhängig vom Zeitpunkt der Erreichung. Im zweiten Abschnitt werden die kurz- und mittelfristigen Maßnahmen diskutiert, ohne die eine 95 %ige Reduktion bis 2050 nicht erreichbar ist. Es zeigt sich jedoch, dass eine spätere Erreichung des Ziels, z.B. in 2060, diese Maßnahmen zwar zeitlich entzerrt, auf die Art und Eingriffstiefe der Maßnahmen jedoch kaum Einfluss hat.

Zentrale Schlussfolgerung

Die nachfolgenden Erkenntnisse sind Ergebnis grundsätzlicher Überlegungen zu möglichen Optionen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 %. Sie gelten unabhängig vom Zeitpunkt der Zielerreichung.

1. **Eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % geht deutlich über eine Beschleunigung eines 80%igen Transformationspfades hinaus und bedeutet eine vollständige Ausschöpfung der technisch verfügbaren Reduktionspotentiale.** Die quasi-unvermeidbaren Emissionen aus den Bereichen Landwirtschaft und Industrie füllen bereits nahezu das gesamte verbleibende Emissionsbudget
2. **Alle Sektoren müssen ein Höchstmaß an Dekarbonisierung erreichen.** Aufgrund der sehr niedrigen Emissionsbudgets sind nur noch sehr geringe Verschiebungen zwischen Sektoren möglich.
 - a. **Investitionen in langlebige Infrastrukturen müssen bereits heute zukünftige CO₂-Neutralität berücksichtigen.** Dies gilt z.B. für Gebäude, Industrie und Kraftwerke.
 - b. **Ohne deutliche Verhaltensänderungen ist das Ziel kaum zu erreichen.** So können z.B. in der Landwirtschaft ohne eine Reduktion und Veränderung von Fleischproduktion und -konsum die Emissionen nicht auf das nötige Niveau gesenkt werden. Das Potential dieser und anderer sogenannter Suffizienzmaßnahmen kann grundsätzlich erheblich sein. Ihre Bewertung ist allerdings herausfordernd und betrifft angesichts der zum Teil damit verbundenen hohen Eingriffstiefe in die individuelle Lebensgestaltung auch die gesellschaftspolitische Debatte.
3. **Nachhaltig produzierte Biomasse ist eine knappe Brennstoffressource. Dem Energiesystem steht nur eine begrenzte Menge an Biomasse zu Verfügung.** Ihr Einsatz muss sich deshalb auf ausgewählte „Problemgebiete“ wie z.B. den Luftverkehr beschränken.
4. **Ein CO₂-neutraler Stromsektor als Basis für die Bereitstellung von Strom und Wärme bildet das Rückgrat der Energieversorgung.** Erneuerbare Energien müssen in Deutschland und Europa stark ausgebaut werden.
 - a. Transportmittel werden soweit wie möglich mit Strom angetrieben.
 - b. CO₂-neutraler Strom und direkte Nutzung Erneuerbare Energien decken weitgehend den Wärmebedarf.

5. **Die zentrale Motivation für einen effizienten Umgang mit Energie ist die Reduktion von Akzeptanzfragen beim Ausbau der Erzeugungs- und Netzinfrastrukturen für Strom.** Wind und Photovoltaik dominieren die Stromerzeugung. Die hierfür in den Langfristszenarien unterstellten Potentiale in Deutschland liegen in der Größenordnung von 1.000 TWh bei Kosten von maximal 11 cent/kWh. In Europa sind die Potentiale insgesamt sogar noch deutlich größer und z.T. auch günstiger.
6. **Der Gebäudesektor muss seinen Energiebedarf durch schnelle und tiefgehende Sanierungen sehr stark reduzieren.** Dies ist notwendig, um eine effiziente Versorgung durch Erneuerbare Energien und Stromtechnologien zu ermöglichen.
7. **Der Industriesektor steht vor einem grundlegenden Wandel.** Die Umstellung der industriellen Produktion erfordert in vielen Bereichen neue Technologien, Prozesse und andere Stoffnutzungskonzepte. Hier sind erhebliche Anstrengungen in den Bereichen F&E sowie Transformationsanreize und Regulierung notwendig.
8. **CCS ist eine Schlüsseltechnologie für die Industrie.** CCS kann eine wichtige Option sein, um Prozessemissionen in der Industrie und ggf. Emissionen bei der Bereitstellung der Fernwärme zu reduzieren. Ohne CCS steigt der Innovationsdruck für den Industriesektor deutlich an.
9. **Für eine 95%-Reduktion der Treibhausgasemissionen ist ein gemeinsames europäisches, letztlich weltweites Vorgehen zwingend notwendig;** ohne dieses kann *Carbon Leakage* durch Verlagerung von Strom- und Industrieproduktion ins Ausland kaum verhindert werden, wodurch die Klimawirkung von Maßnahmen gemindert oder negiert wird.
10. **Negative Emissionen durch Biomasse-CCS können nur einen begrenzten Beitrag leisten.** Biomasse-CCS kann zwar bereits bei CO₂-Preisen unter 100 Euro/t attraktiv werden; da aber nur wenig Biomasse für zentrale Anwendungen zur Verfügung steht, ist das Einsparpotential begrenzt. Auch der Beitrag anderer „künstlicher“ CO₂-Senken sollten aus heutiger Sicht als begrenzt angesehen werden. Das Wissen über diese Technologien ist derzeit zu gering, um sie angemessen als Alternativen bewerten und berücksichtigen zu können. Daher sollten sich Aktivitäten in diesem Bereich zunächst weiter auf eine vertiefte Forschung konzentrieren.
11. **Die ökonomischen Wirkungen eines 95%-Szenarios sind nur schwer abzusehen.** Einige Technologien, die aus heutiger Sicht für das Erreichen eines 95%-Ziels erforderlich wären, befinden sich zumeist erst im Forschungsstadium. Mehrkosten z. B. im Vergleich zu einem 80%-Szenario sind daher

kaum zu beziffern. Noch schwieriger zu bewerten sind die gesamtwirtschaftlichen Folgen, z. B. die Wirkungen von Strukturänderungen. Eine ökonomische Bewertung muss zudem die Konsequenzen einer Zielverfehlung oder Änderungen der (internationalen) Rahmenbedingungen berücksichtigen, die dazu führen könnten, dass man von einem einmal eingeschlagenen 95-%-Pfad wieder abweicht.

Akzeptanz ist die zentrale „Währung“ des Transformationsprozesses.

Insgesamt zeigt sich, dass in allen Sektoren Herausforderungen entstehen, die aus heutiger Sicht unpopuläre Maßnahmen und/oder zusätzliche Ausgaben erfordern. Dies gilt z.B. für den Ausbau der Infrastrukturen im Stromsektor, Veränderung des Landschaftsbilds, die Gebäudesanierung oder Änderungen der Ernährungsgewohnheiten. Die Sicherung der nötigen gesellschaftlichen Akzeptanz ist die zentrale Klammer, die den Energiewendeprozess zusammenhält.

Notwendige Maßnahmen

Nachfolgend werden Maßnahmen aufgeführt, die aus heutiger Sicht erforderlich wären, sofern die Option einer 95%igen Dekarbonisierung bis 2050 offengehalten werden soll. Für eine spätere Erreichung dieses Ziels, z.B. in 2060, gelten jedoch grundsätzlich die gleichen Bedingungen. Die notwendigen Maßnahmen würden dadurch teilweise zeitlich entzerrt, die mit den erforderlichen Schritten verbundene und zum Teil erhebliche Eingriffstiefe würde sich aber nicht verändern.

Die dargelegten Schritte sind nicht als konkrete Empfehlungen zu verstehen, sondern sollten in einer „Wenn-dann“-Logik interpretiert werden: Wenn man sich dafür entscheidet, mit den aus heutiger Sicht realistisch verfügbaren Technologien die Option für eine 95%ige Dekarbonisierung bis etwa zur Jahrhundertmitte offenzuhalten, dann wären dazu bestimmte Schritte erforderlich. Diese Erfordernisse entstehen insbesondere, um angesichts langlebiger Infrastrukturen Lock-In Effekte oder zumindest erhebliche *stranded investments* und damit einhergehende Opportunitätskosten zu vermeiden. Andersherum gilt aber auch: Ergreift man heute ausschließlich mit Blick auf die Erhaltung der 95%-Option bestimmte Maßnahmen und verzichtet im Weiteren darauf, den 95%-Pfad weiterzuverfolgen, so können sich auch diese Maßnahmen als volkswirtschaftlich ineffizient erweisen.

1. **Maßnahmen zur deutlichen Erhöhung und Stärkung des europaweiten CO₂-Preissignals.** Eine vollständige Dekarbonisierung ist ohne eine glaubwürdige, dauerhafte und ambitionierte Stärkung des europaweiten CO₂-Preissignals nicht möglich. Hierzu wäre ein CO₂-Preis von (ggf. deutlich) über 50 EUR/t CO₂ bereits in 2030 vermutlich unerlässlich, um die 95%-Option erreichbar zu halten.
2. **Beschleunigung des Ausbaus Erneuerbarer Energien.** Für die stärkere Elektrifizierung ist ein schnellerer Ausbau der Erneuerbaren Energien unumgänglich; der Ausbaukorridor müsste in der Folge angepasst werden.
3. **Zeitnahe Entscheidung über die Rolle von CCS ist notwendig.** Fiele diese Entscheidung positiv aus, sollte die Technologie zeitnah stark gefördert werden. Andernfalls sollte der Entwicklung alternativer Lösungen für bestimmte Bereiche wie Fernwärme und Prozessemissionen hohe Priorität eingeräumt werden.
4. **Ausstieg aus PKW mit Verbrennungsmotoren auf Basis fossiler Brennstoffe.** Zur Erreichung des 95%-Ziels dürften spätestens 15 Jahre vor angestrebter Zielerreichung, also z.B. ab 2035, keine PKW mehr mit Verbrennungsmotor verkauft werden, sofern der Kraftstoff nicht CO₂-neutral bereitge-

stellt werden kann. Zumindest aus heutiger Sicht erscheint die Möglichkeit einer ausreichenden und ökonomisch effizienten Bereitstellung sowohl durch Biokraftstoffe als auch durch strombasierte Kraftstoffe wenig plausibel.

5. **Schnelle und tiefe Sanierung der Gebäude.** Im Gebäudesektor wäre eine Steigerung der energetischen Sanierungsraten (und –tiefen) deutlich über das bisherige Ziel von 2 % notwendig. Förderungen dürften nur noch für Maßnahmen gewährt werden, die mit der vollständigen Dekarbonisierung vereinbar sind, d.h. keine weitere Förderung von Öl- oder Gasheizungen.
6. **Ausbau und Verdichtung der Wärmenetze.** Wärmenetze erleichtern den Brennstoffwechsel in der Wärmeversorgung. Entsprechende Förderung zum Erhalt, Ausbau und der Verdichtung von Wärmenetzen sind deshalb ein wichtiger Baustein der Wärmewende. Dieser Aspekt gilt in einem möglichen 95%-Pfad in besonderem Maße.
7. **Stärkung der Transformationsanreize im Industriesektor.** Im Industriesektor müsste aufgrund langer Anlagenlebensdauern der CO₂-Preis zeitnah durch weitere Maßnahmen unterstützt werden. Auch für Unternehmen außerhalb des ETS wären starke Transformationsanreize notwendig. Dabei müssten auch Mittel gefunden werden um die Gefahr bzw. Auswirkungen von Carbon Leakage zu minimieren.
8. **Steigerung der Materialeffizienz.** Maßnahmen zur Forcierung der Materialeffizienz und der Substitution CO₂-intensiver Materialien (z.B. Zement) kommt für den 95%-Pfad eine besondere Bedeutung zu.
9. **Verstärkte Forschung zu Schlüsseltechnologien.** Für bestimmte Schlüsseltechnologien müssten die Anstrengungen in Forschung und Entwicklung schnell erhöht werden:
 - a. **Nahezu unverzichtbare Technologien:** Bestimmte Technologien, die für einen 80%igen Reduktionspfad (zumindest unter bestimmten Voraussetzungen) als optional anzusehen sind, sind für einen 95%-Pfad nahezu unabdingbar, wie z.B.
 - Biokraftstoffe, insbesondere Biokerosin der zweiten und dritten Generation
 - Strombasierte Lösungen im Schwerlastverkehr, wie z. B. Oberleitung-LKW
 - CO₂-arme Prozesse zur Herstellung von Zementtypen und Stahl
 - b. **Technologien mit wichtigem Potential.** Andere Technologien haben bei entsprechenden Entwicklungen Potential zu einem wichtigen Beitrag. Dazu zählen z.B.:
 - Künstliche CO₂-Senken, insbesondere Biomasse CCS

- Kohlendioxid-Abscheidung aus der Luft
- Strombasierte Kohlenwasserstoffe. Sollten die Kosten der Kohlendioxid-Abscheidung sehr stark gesenkt werden können, könnten auch aus Strom erzeugte Kohlenwasserstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquid) eine Rolle spielen und sollten weiter erforscht werden

10. **Diversifizierung der Forschung.** Aufgrund der substanziellen technologischen Unsicherheiten ist eine hinreichende technologische Diversität bzgl. der F&E Anstrengungen zu wahren, um potenziell wichtige Pfade nicht frühzeitig auszuschließen. Die gilt insbesondere vor dem Hintergrund des hohen Ambitionsniveaus einer 95%igen Reduktion der Treibhausgasemissionen. Aufgrund der hohen Bedeutung von Akzeptanz und Governance sollten auch diese Bereiche im Fokus der Forschung stehen.