



Leopoldina  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften



November 2017

Kurzfassung der Stellungnahme

## »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Die Entwicklung der deutschen Treibhausgasemissionen in den vergangenen Jahren steht im Gegensatz zum erklärten Ziel einer kontinuierlichen Absenkung – obwohl der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung fortwährend gestiegen ist. Dies ist nur eine von verschiedenen Beobachtungen, die am Anfang der Arbeitsgruppe „Sektorkopplung“ standen. Das Akademienprojekt kommt zu dem Schluss, dass die Klimaschutzziele nur erreicht werden können, wenn das Energiesystem ganzheitlich über alle Sektoren hinweg betrachtet und optimiert wird und sich die Gesellschaft dieser Aufgabe bewusst stellt. Zentrale Ergebnisse lauten:

- **Strom** aus regenerativen Quellen wird zum **dominierenden Energieträger** im Energiesystem. Der Strombedarf könnte sich bis 2050 nahezu verdoppeln. Als Folge müsste die Kapazität der **Windkraft- und Photovoltaikanlagen** auf ein Fünf- bis Siebenfaches anwachsen.
- Technologien wie Elektroautos und Wärmepumpen, die Strom direkt und effizient nutzen, werden in Zukunft immer wichtiger. Doch auch **synthetische Brenn- und Kraftstoffe** sind voraussichtlich unverzichtbar.
- **Kurz- und Langzeitspeicher** sowie **flexible Stromnutzungsmodelle** müssen künftig die volatile Stromerzeugung ausgleichen helfen. Auch **Reservekapazitäten** werden benötigt, um die Versorgung in „Dunkelflauten“ abzusichern. Ihr Umfang entspricht etwa dem heutigen konventionellen Kraftwerkspark.
- Die Energiewende führt jährlich zu **systemischen Mehrkosten** in Höhe von ein bis zwei Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts.
- Zentrales Steuerungselement ist ein **einheitlicher, wirksamer CO<sub>2</sub>-Preis**. Dieser kann erreicht werden, indem der europäische Emissionshandel auf alle Sektoren ausgeweitet und mit einem Mindestpreis beaufschlagt oder eine CO<sub>2</sub>-Steuer eingeführt wird.

## Schlüsseltechnologien für die künftige Energieversorgung

Die Arbeitsgruppe hat basierend auf **Expertendiskussionen**, einem **Vergleich relevanter Energieszenarien** und **eigenen Modellrechnungen** Schlüsselstellen des Energiesystems identifiziert, die Rolle einer zunehmenden Sektorkopplung für die künftige Energieversorgung analysiert und daraus Handlungsoptionen abgeleitet. Die Modellrechnungen wurden mit dem Simulations- und Optimierungsmodell REMoD-D des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE durchgeführt. Das Modell berechnet den kostenoptimierten Transformationspfad des Energiesystems von heute bis 2050 bei vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Minderungszielen und unter Einbeziehung aller Sektoren und Energieträger.

### Energieträger der Zukunft

Strom aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen wird zum dominierenden Energieträger. Ihn direkt zu nutzen ist technisch gesehen oft effizienter und kostengünstiger, als den Strom in Wasserstoff oder Methan umzuwandeln. So kann regenerativ erzeugter Strom beispielsweise Elektroautos oder Wärmepumpen antreiben. Der gezielte Einsatz von **Bioenergie, Solarthermie und Geothermie** kann dazu beitragen, den Ausbau an Windkraft und Photovoltaik zu begrenzen und die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende zu sichern.

Auch **synthetische Brenn- und Kraftstoffe** werden in Zukunft zu einem wichtigen Pfeiler des Energiesystems. Sie sind gut speicherbar und können zum Beispiel im Schiff- und Flugverkehr verwendet werden, wo rein elektrische Lösungen nur schwer oder gar nicht umsetzbar sind. **Wasserstoff** kommt eine besondere Rolle zu, weil er viele Funktionen im Energiesystem einnehmen kann: Er kann in Industrieprozessen, zur Wärmeversorgung in Gebäuden oder als Kraftstoff im Verkehr eingesetzt, für die zeitversetzte Stromerzeugung genutzt oder in Methan beziehungsweise flüssige Kraftstoffe umgewandelt werden. **Gas** – natürliches Erdgas, Biogas und synthetische Gase – ist emissionsarm und vielseitig einsetzbar und könnte langfristig neben Strom zu einem zentralen Energieträger werden.

### Die Sektoren im Überblick

Weniger Energieverbrauch und emissionsärmere Technologien – mit diesen Stellschrauben kann die Wärmebereitstellung in **Gebäuden** klimafreundlicher werden. Bis 2050 sollte der Gebäudebestand saniert werden. Dazu müssten die Sanierungsquoten erhöht werden. Gleichzeitig gilt es, die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Heizungstechnologien auf etwa ein Drittel des heutigen Wertes zu senken. Neben elektrischen Wärmepumpen, die dabei eine Schlüssel-funktion einnehmen werden, bieten Gaswärmepumpen, Solarthermie und zentrale Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen hierfür wichtige Optionen. Wärmenetze werden eine wichtige Rolle spielen. Sie könnten knapp ein Drittel aller Gebäude mit Energie versorgen.

In der **Industrie** kann neben dem Einsatz von Biogas die Elektrifizierung von Wärmeprozessen dazu beitragen, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken. Dem sind jedoch Grenzen gesetzt: Wärmepumpen sind oberhalb von etwa 200 Grad Celsius nicht einsetzbar und alternative Technologien wie Elektrodenheizkessel sind weniger effizient. Etliche Prozesse benötigen außerdem prozessbedingt chemische Brennstoffe. Hybridsysteme aus Strom und Gas können helfen, die Stromnutzung zu flexibilisieren. Nachteilig sind jedoch die hohen Investitionskosten für doppelte Infrastrukturen. Ein wichtiger Hebel, um Energieträger effizient zu nutzen, ist die Weiterverwendung von Abwärme, beispielsweise durch die Einspeisung in Wärmenetze.

Der **Verkehrssektor** bildet aktuell das Schlusslicht der Energiewende. Effiziente Antriebe und Kraftstoffe sowie der stärkere Einsatz erneuerbarer Energien sind entscheidende Ansätze, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, angetrieben mit Strom aus erneuerbaren Energien, werden für die Mobilität der Zukunft unverzichtbar. Hybrid-Fahrzeuge mit Elektro- und Verbrennungsmotoren können den Nachteil einer zu geringen Reichweite der Elektroautos umgehen. Im Schwerlast- und Fernverkehr zeichnen sich hingegen noch keine eindeutigen Lösungen ab. Wasserstoff, synthetisches Erdgas, synthetische Kraftstoffe oder elektrische Oberleitungen bieten aus heutiger Sicht mögliche Optionen. Diese Technologien sollten weiterentwickelt und in Pilotprojekten intensiv getestet werden.

### Effizienz, Flexibilität und Versorgungssicherheit

Um den steigenden Strombedarf aus erneuerbaren Quellen zu decken, werden **Wind- und Photovoltaikanlagen** sehr stark ausgebaut werden müssen. Für eine klimaschonende Energieversorgung müsste die Kapazität gegenüber heute auf ein Fünf- bis Siebenfaches ansteigen. **Maßnahmen zur effizienten Nutzung von Energie** können helfen, diesen Ausbau zu begrenzen. Die im Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017 vorgesehenen Fördermengen werden jedoch nicht ausreichen, um den künftigen Bedarf zu decken.

**Kurz- und Langzeitspeicher** sowie **flexible Stromnutzungsmodelle** werden benötigt, um die volatile Stromerzeugung zu glätten. Neben Pumpspeichern und Batterien, die Schwankungen für wenige Stunden abpuffern, werden flexible Elektrolyseanlagen zur Herstellung von Wasserstoff an Bedeutung gewinnen. Als **Langzeitspeicher** kommt das Erdgasnetz mit den dazugehörigen Kavernen- und Porenspeichern infrage.

Um die Versorgung in allen Wetterlagen und zu allen Jahreszeiten zu sichern, kommt auch das Energiesystem der Zukunft nicht ohne **Reservekapazitäten** aus – mit voraussichtlich etwa 100 Gigawatt wird der Umfang etwa dem heutigen konventionellen Kraftwerkspark entsprechen. Aus Klimaschutzgründen eignen sich dafür emissionsarme **Gaskraftwerke**, die mit Wasserstoff, Erdgas oder synthetischem Methan betrieben werden, oder **Brennstoffzellen**. Auch flexible **Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen** können die Versorgung absichern. Kohlekraftwerke spielen hingegen künftig keine Rolle mehr.

Da alle Kraftwerke im Energiesystem der Zukunft nur noch bei längeren „Dunkelflauten“ betrieben werden, muss der Marktrahmen Geschäftsmodelle bieten, damit diese auch mit wenigen Betriebsstunden rentabel bleiben.

## Kosten und Steuerungselemente

### Kosten der Energiewende

Durch den Ausbau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen, die Einführung neuer Technologien und die notwendige Pufferkapazität wird das **Stromsystem technisch wesentlich aufwändiger** als heute. Im Vergleich zu einem auf fossilen Energieträgern basierenden Versorgungssystem führt die Energiewende daher zu beträchtlichen jährlichen **Mehrkosten**. Diese liegen – bei aller Unsicherheit, die naturgemäß bei derartigen Projektionen gegeben ist – im Mittel zwischen **ein bis zwei Prozent des heutigen deutschen Bruttoinlandsprodukts**. Dies beinhaltet Kosten für den technischen Umbau des Energiesystems, also etwa für den Auf- und Umbau sowie die Wartung der Infrastrukturen (wie Kraftwerke, Netze und Fahrzeugflotten) sowie Kosten für die Energieträger und die energetische Sanierung von Gebäuden.

### Politische Steuerungselemente

Bisher haben es klimaschonende Technologien schwer, sich am Markt zu etablieren. So ist Strom beispielsweise mit höheren Abgaben, Umlagen und Steuern belastet als Erdgas und Heizöl. Damit die Sektorkopplung ihr volles Potenzial entfalten kann, müssen die Märkte für Strom, Wärme und Verkehr zusammenwachsen und gleiche Bedingungen für alle Energieträger bieten. Ein **einheitlicher, wirksamer CO<sub>2</sub>-Preis für alle Emissionen** kann hierfür die zentrale Rolle spielen.

Eine Möglichkeit besteht darin, das **europäische Emissionshandelssystem (EU ETS)** auf alle Sektoren auszuweiten und einen Preiskorridor festzulegen. Gelingt dies nicht, könnte eine **europaweite oder nationale CO<sub>2</sub>-Steuer** eingeführt werden. Sie sollte dabei so ausgestaltet werden, dass sie das EU ETS sinnvoll ergänzt und gleichzeitig einen wirksamen Mindestpreis festsetzt. Mit einem Preiskorridor im ETS oder einer CO<sub>2</sub>-Steuer wäre die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Preise besser planbar und würde Unternehmen mehr Sicherheit geben, in klimafreundliche Technologien zu investieren. Ein weiterer Vorteil: Bisherige **Umlagen, Abgaben und Steuern** könnten durch einen sektorübergreifenden CO<sub>2</sub>-Preis teilweise **ersetzt beziehungsweise abgebaut** werden. Um auch international faire Wettbewerbsbedingungen zu schaffen, könnte an eine **Besteuerung emissionsintensiver Importe** gedacht werden.

Ein einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis ist jedoch kein Allheilmittel. In allen Bereichen des Energiesystems können Hemmnisse den Einsatz klimaneutraler Technologien verhindern. Um sie abzubauen, sind **ergänzende Maßnahmen** erforderlich. Neben finanziellen Anreizen wie Investitionszuschüssen, Steuererleichterungen, Marktanreizprogrammen und einer staatlichen Kofinanzierung von Infrastrukturen kann es sinnvoll sein, ordnungsrechtliche Vorgaben etwa zu Emissionsgrenzwerten und technischen Standards beizubehalten oder zu etablieren. Auch Forschungs- und Entwicklungsförderung oder Informations- und Beratungsangebote können helfen, neue Technologien in die Breite zu tragen.

Damit Marktakteure überhaupt in klimafreundliche Technologien investieren, brauchen sie **Planungssicherheit**. Voraussetzungen dafür sind eine **Selbstverpflichtung der Politik zum Klimaschutz** und das Vertrauen aller beteiligten Gruppen in die **Verbindlichkeit der Klimaschutzziele** sowie den langfristigen Bestand der CO<sub>2</sub>-Preise.

## Phasen der Energiewende

Deutschland tritt in eine neue Phase der Energiewende ein. Nachdem in den vergangenen 25 bis 30 Jahren Windkraft- und Photovoltaikanlagen, aber auch Biomassetechnologien entwickelt, ausgebaut und die Kosten signifikant gesenkt wurden, stehen nun die **Basistechnologien** für eine umfassende **Systemintegration** zur Verfügung. Von nun an geht es darum, Technologien der Sektorkopplung zu fördern und umzusetzen. Das heißt konkret, Strom überall dort direkt zu nutzen, wo es am effizientesten ist – etwa in Elektroautos und Wärmepumpen –, Batterien als Kurzzeitspeicher einzusetzen und flexible, digital gesteuerte Stromnutzungsmodelle zu entwickeln.

**Wasserstoff** wird die dritte Phase der Energiewende maßgeblich prägen: Einerseits ist er für Anwendungsgebiete notwendig, in denen keine rein elektrischen Lösungen absehbar sind – entweder direkt oder in Verbindung mit einer weiteren Umwandlung in **synthetische Brennstoffe**. Andererseits wird der weitere Ausbau fluktuierender Erneuerbarer zunehmend zu großen Strommengen führen, die nicht mehr direkt oder durch Kurzzeitspeicher und Lastmanagement abgenommen werden können. Wasserstoff kann helfen, diese Energie zu speichern. In der vierten und letzten Phase der Energiewende werden **fossile Energieträger** endgültig aus dem Energiesystem **verdrängt**. In Deutschland wird dies vermutlich nur machbar sein, wenn zusätzlich Strom oder aus regenerativen Quellen produzierte chemische Energieträger aus wind- und sonnenreichen Ländern importiert werden.

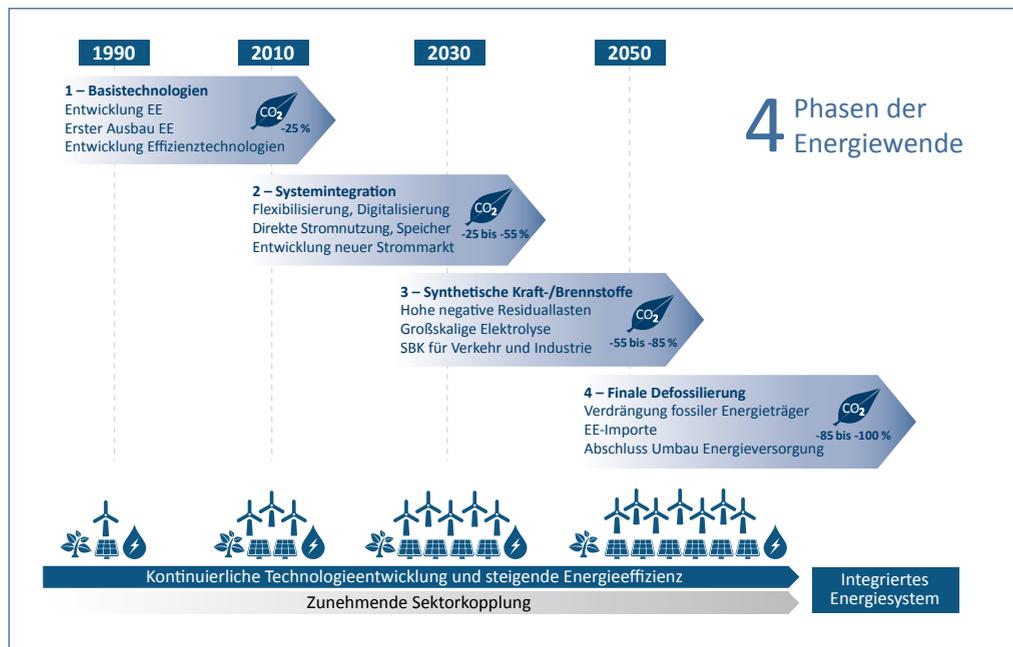


Abbildung 1: Vier Phasen der Energiewende

## Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“

Die Stellungnahme »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende ist im Rahmen des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ entstanden. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten rund 100 Expertinnen und Experten Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren Energieversorgung.

### Mitwirkende der Arbeitsgruppe „Sektorkopplung“

**Mitglieder:** Prof. Dr. Hans-Martin Henning (AG-Leitung, Fraunhofer ISE), Prof. Dr. Eberhard Umbach (AG-Leitung, acatech Präsidium), Dr. Frank-Detlef Drake (RWE), Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick (Wuppertal Institut), Prof. Dr. Justus Haucap (Universität Düsseldorf), Prof. Dr. Hans-Martin Henning (Fraunhofer ISE), Prof. Dr. Gundula Hübner (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg), Prof. Dr. Wolfram Münch (EnBW), Prof. Dr. Karen Pittel (Ifo Institut), Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz (TU Dortmund), Prof. Dr. Jörg Sauer (KIT), Prof. Dr. Ferdi Schüth (MPI für Kohleforschung), Prof. Dr. Kurt Wagemann (DECHEMA), Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner (Ruhr-Universität Bochum), Prof. Dr. Ulrich Wagner (TU München)

**Wissenschaftliche Referenten:** Dr. Florian Ausfelder (DECHEMA), Dr. Berit Erlach (acatech), Dr. Christoph Kost (Fraunhofer ISE), Dr. Katharina Schätzler (KIT), Dr. Cyril Stephanos (acatech), Michael Themann (RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung)

### Kontakt:

Dr. Ulrich Glotzbach  
Leiter der Geschäftsstelle Energiesysteme der Zukunft  
Markgrafenstraße 22, 10117 Berlin  
Tel.: +49 30 2067957-0 | E-Mail: [glotzbach@acatech.de](mailto:glotzbach@acatech.de)

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

Deutsche Akademie der  
Naturforscher Leopoldina e. V.  
Nationale Akademie der  
Wissenschaften  
Jägerberg 1  
06108 Halle (Saale)  
Tel.: 0345 47239-867  
Fax: 0345 47239-839  
E-Mail: [politikberatung@leopoldina.org](mailto:politikberatung@leopoldina.org)  
Berliner Büro:  
Reinhardtstraße 14  
10117 Berlin

acatech – Deutsche Akademie  
der Technikwissenschaften e. V.  
Geschäftsstelle München:  
Karolinenplatz 4  
80333 München  
Tel.: 089 520309-0  
Fax: 089 520309-9  
E-Mail: [info@acatech.de](mailto:info@acatech.de)  
Hauptstadtbüro:  
Pariser Platz 4a  
10117 Berlin

Union der deutschen Akademien  
der Wissenschaften e. V.  
Geschwister-Scholl-Straße 2  
55131 Mainz  
Tel.: 06131 218528-10  
Fax: 06131 218528-11  
E-Mail: [info@akademienunion.de](mailto:info@akademienunion.de)  
Berliner Büro:  
Jägerstraße 22/23  
10117 Berlin