



## ENERGIE

# Ist die Energiewende noch zu retten?

**Der Sektorkopplung könnte eine wichtige Rolle zukommen, um die Ziele der deutschen Energiewende zu erreichen.**

Eberhard Umbach und Hans-Martin Henning





Im Herbst 2010 hat die deutsche Bundesregierung ehrgeizige Ziele zur Energiewende beschlossen. Doch nun zeichnet sich ab, dass einige davon nicht mehr zu erreichen sind. Die ganzheitliche Behandlung des gesamten Energiesystems in Deutschland – die so genannte Sektorkopplung – könnte helfen, um die künftige Energieversorgung viel klimafreundlicher zu gestalten.

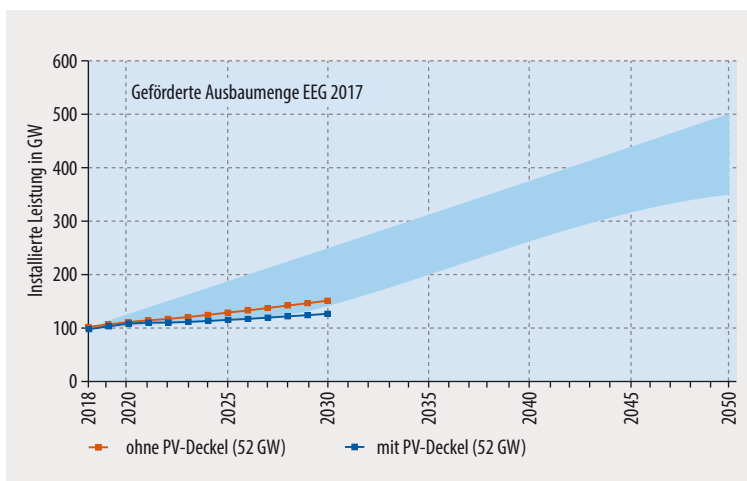
Der jüngste IPCC-Report hat uns wieder daran erinnert, dass der derzeitige globale Temperaturanstieg gravierend ist und wir den höchsten  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Atmosphäre seit mehreren hunderttausend Jahren haben [1]. In beiden Fällen ist die Tendenz rapide steigend. Dagegen sind die Fortschritte zur Reduktion der Emissionen von Treibhausgasen, insbesondere von  $\text{CO}_2$ , eher enttäuschend. Nach inzwischen einhelliger Ansicht der Klimaforscher sind sie sogar völlig unzureichend, wenn es gilt, den globalen Temperaturanstieg auf ein verkraftbares Maß zu begrenzen. Der Hauptverursacher für die  $\text{CO}_2$ -Emissionen ist die Umwandlung von fossiler Primärenergie in Nutzenergie. Daher bemühen sich inzwischen nahezu alle Nationen darum, ihre Energiesysteme von fossilen hin zu erneuerbaren Energien umzubauen.

Deutschland hat mit seinen 2010 bzw. 2011 beschlossenen Energiewendezielen (**Infokasten**) eine Zeit lang eine gewisse Vorreiterrolle eingenommen – anfangs international bewundert oder belächelt, auf jeden Fall mit großer Aufmerksamkeit verfolgt. Inzwischen sind die Vorschusslorbeeren aber verwelkt. Eine Reihe von Nahzielen wird mit Sicherheit verfehlt, und extrapoliert man die Entwicklungen der letzten Jahre, zeigt sich ziemlich deutlich, dass auch die Fernziele bis 2050 fraglich scheinen. Bei der Analyse der bisherigen Entwicklung sämtlicher Indikatoren stellt sich die Frage, ob die Ziele überhaupt noch zu erreichen sind, und wenn ja, mit welchen Investitionen, Kosten sowie technologischen und gesellschaftlichen Veränderungen.

Die nationalen Akademien acadtech, Leopoldina und die Union der deutschen Akademien sind im Rahmen des Projekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) unter anderem dieser Frage nachgegangen. Speziell hat sich eine interdisziplinär zusammengesetzte Arbeitsgruppe aus dreißig Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der „Sektorkopplung“ gewidmet. Dabei geht es um die gemeinsame Betrachtung der Energiesektoren Stromerzeugung, Wärme-/Kälteerzeugung und Verkehr und somit um eine ganzheitliche Behandlung des gesamten Energiesystems in Deutschland. Eine grenzüberschreitende Betrachtung für Europa wurde aufgrund des enormen Aufwands zunächst zurückgestellt. Die Ergebnisse der Studie haben den öffentlichen Diskurs befeuert [2, 3]. Im Folgenden werden einige Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Papieren extrahiert, um eine Reihe von Schlüsselfragen zu beantworten.

### Sind die $\text{CO}_2$ -Reduktionsziele noch realistisch?

Aller Voraussicht nach werden die Nahziele für 2020 – also eine Reduktion der Treibhausgase um 40 Prozent – deutlich verfehlt. Da Änderungen eine gewisse Zeit brauchen, bis sie Erfolge zeigen, sind aber auch alle späteren Ziele in Gefahr,



**Abb. 1** Basierend auf Modellrechnungen für eine Reduktion energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen um 85 Prozent sollte sich die summarische installierte Leistung von Windkraft und Photovoltaikanlagen im gezeigten Korridor entwickeln. Der untere Rand ergibt sich aus Rechnungen mit Annahmen, welche die Erreichung der Reduktionsziele erleichtern (insbesondere Einsparungen), am oberen Rand entfallen diese Annahmen. Orange Quadrate zeigen die Ausbautwicklung nach dem EEG 2017 ohne Begrenzung der Photovoltaik-Leistung, blaue Quadrate mit Begrenzung auf 52 GW.

wenn nicht unmittelbar und entschlossen gehandelt wird. Rechnungen mit dem vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE entwickelten ReMod-Programmpaket<sup>1)</sup> zeigen aber, dass einige spätere Ziele erreichbar scheinen, wenn ein substantieller Umbau der Energieversorgung zügig in Angriff genommen wird [4].

Ohne substantielle Änderungen lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen nur um 60 Prozent reduzieren. Allerdings sind sich die Klimaforscher einig, dass dies nicht ausreicht. Eine Reduktion um 80 bzw. 85 Prozent erscheint nach den Rechnungen mit vertretbarem Aufwand möglich, wenn durch viele Maßnahmen sofort mit dem beschleunigten Umbau des Energiesystems sektorübergreifend begonnen wird. Das wünschenswerte Ziel einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energiewandlung um 95 Prozent bis 2050 scheint aufgrund technischer Randbedingungen, der enormen Zusatzkosten und der trägen Reaktion des politischen und gesellschaftlichen Systems ziemlich unrealistisch [2, 3]. Dies gilt zumindest ohne beträchtliche Importe – sei es als Strom oder als gasförmige bzw. flüssige synthetische Energieträger aus sonnen- oder windreichen Standorten weltweit. Zudem sind bei all dem die gesellschaftlichen Widerstände gegen größere Veränderungen nicht zu unterschätzen.

### Was sind Schlüsselmerkmale des Systemumbaus?

Nur ein substantieller Umbau des Gesamtsystems lässt es als machbar erscheinen, die Klimaziele ohne Abstriche bei der Versorgungssicherheit zu erfüllen. Zuerst erfordert eine Energieversorgung mit drastisch sinkenden Klimagasemissionen eine Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger. Da hier aufgrund der verfügbaren Ressourcen elektrischer Strom aus volatilen Quellen (Sonne, Wind) eine Schlüsselrolle spielen wird, ist ein Paradigmenwechsel in der Struktur der Stromversorgung erforderlich. Die bedarfsgerechte Energiebereitstellung durch Großkraftwerke

ist dabei zu ersetzen durch ein System, in dem fortwährend ein Ausgleich erfolgt zwischen Bereitstellung und Nutzung durch ein komplexes Zusammenspiel aus zeitlich angepasster Energienutzung, temporärem Einsatz flexibler Erzeugungsanlagen und Speichern. Parallel zur Defossilisierung (meist als Dekarbonisierung bezeichnet) der Sektoren Wärme und Verkehr wird elektrischer Strom eine viel größere Rolle spielen: entweder direkt als Endenergie, z. B. für Wärmepumpen oder Batterie-Elektromotoren, oder indirekt durch Verwendung synthetischer Energieträger wie Wasserstoff, Methan oder flüssige Brenn-/Kraftstoffe. Daher sind umso größere Mengen an Solar- und Windenergieanlagen nötig. Energieeffizienz und – wo möglich – Einsparung durch reduzierten Verbrauch sind daher essenziell. Sie führen nicht nur zu weniger Emissionen, sondern begrenzen die Zahl der Anlagen zur Wandlung erneuerbarer Energien, um die Akzeptanz des Ausbaus nicht zu gefährden.

### Welche Kapazitäten erneuerbarer Energien sind nötig?

Das ist vor allem eine gesellschaftlich spannende Frage, denn wir haben in Deutschland keine allzu große Auswahl. Die Fachleute sind sich weitgehend einig, dass der Einsatz von Biomasse, die heute den Großteil der hierzulande verwendeten erneuerbaren Energien ausmacht, nicht signifikant zu steigern ist.<sup>2)</sup> Daher gilt es, die vorhandene Biomasse möglichst effizient, systemdienlich und nachhaltig zu verwenden und dafür die nötigen Rahmenbedingungen zu schaffen bzw. Maßnahmen einzuleiten [5]. Ein Ausbau der Wasserkraft zur Stromerzeugung ist nur sehr begrenzt möglich und fällt in der Gesamtbilanz mit rund 0,5 Prozent kaum ins Gewicht. Sinnvoll scheint es, tiefe Geothermie und Solarthermie, die 0,1 bzw. 0,2 Prozent ausmachen, verstärkt zu verwenden. Die Auswirkungen auf die gesamte Energiebilanz sind aber eher begrenzt [2, 3].

So bleiben Windkraft und Photovoltaik als prinzipiell beliebig ausbaubare erneuerbare Energien. In der Tat zeigen die Rechnungen, dass der massive Ausbau dieser beiden Quellen es ermöglichen kann, die Emissionen um 85 Prozent zu reduzieren. Je nach Zusammensetzung des Energiesystems wäre dafür ein fünf- bis siebenfacher Ausbau im Vergleich zu heute erforderlich (**Abb. 1**). Dass dieses Unterfangen schwierig ist, zeigen die Proteste und unzähligen Bürgerinitiativen gegen den Ausbau der Windkraftwerke und Stromtrassen. Allerdings müssten die neuen Anlagen nicht ausschließlich in Deutschland stehen, zumal weder die Sonneneinstrahlung noch das Windaufkommen in weiten Teilen des Landes optimal sind.

1) REMod-D berechnet kostenoptimiert technisch mögliche Transformationspfade des Energiesystems mit allen Systemkomponenten und für alle Verbrauchssektoren von heute bis 2050, wobei eine vorgegebene Obergrenze erlaubter CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht überschritten wird. Die Modellrechnungen beschreiben, wie die Entwicklung von Gesamtsystemen aussehen kann, bei der möglichst geringe systemische Gesamtkosten anfallen und die erwünschte Minderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht und die Energieversorgung zu jedem Zeitpunkt sichergestellt wird.

2) Laut dem BMWi verteilte sich der Primärenergieverbrauch 2017 folgendermaßen: fossile Energieträger 80,3 %, Kernenergie 6,1 %, erneuerbare Energien 13,2 %, davon Biomasse und Abfall 8,1 %, Windkraft 2,8 %, Photovoltaik 1,1 %.



**Abb. 2** Die Elektromobilität ist eine wichtige Säule, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

### Welche Hauptveränderungen werden eintreten?

Die erforderliche drastische Reduktion fossiler Kraft- und Brennstoffe bedingt also, dass wir viel mehr Wind- und Photovoltaikanlagen sowie Stromleitungen und Speicher installieren müssen. Strom wird daher zum wichtigsten (Zwischen-)Energieträger. Aus diesem Grund dürfte sich der Strombedarf auf etwa 1000 TWh verdoppeln [2, 3]. Somit ist es entscheidend, diesen hocheffizienten Energieträger auch in den Sektoren Wärme und Mobilität („Sektorkopplung“) möglichst direkt zu nutzen.

**Beispiel Wärmeversorgung:** Elektrisch betriebene Wärmepumpen erlauben es, die Energieeffizienz enorm zu steigern; bei der Niedertemperaturwärme (Heizung und Warmwasser) lassen sich unter Nutzung von Umgebungswärme aus einem Kilowatt Strom mindestens 3 Kilowatt Wärme erzeugen. Um das 85-prozentige CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel zu erreichen, sind bis 2050 etwa 16 Millionen Wärmepumpen zu installieren [3], flankiert durch Um- bzw. Neubauten der Heizungssysteme und geeignete Wärmedämmmaßnahmen.

**Beispiel Verkehr:** Beim Individualverkehr vor allem in Ballungsräumen werden wir zügig auf Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge umsteigen müssen, wobei deren Energieversorgung vor allem durch Batterien und Brennstoffzellen erfolgt. Für Brennstoffzellen muss der benötigte möglichst „grüne“ Wasserstoff in ausreichender Menge zur Verfügung stehen [2, 3]. Falls wir das 85-prozentige Reduktionsziel erreichen wollen, wären laut Rechnungen 42 Millionen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren durch Elektrofahrzeuge zu ersetzen [3]. Dafür reicht die derzeitige Umstiegsrate jedoch bei weitem nicht aus: Statt jährlich 60 000 neu zugelassenen Elektroautos bräuchten wir 1 bis 1,5 Millionen (**Abb. 2**). Doch für eine solch drastische Veränderung sind weder die Hersteller noch die Infrastrukturen oder die Verbraucher gerüstet.

Die Liste der Veränderungen ist damit keineswegs zu Ende: Statt weniger großer Kraftwerke wird es viele kleine dezentrale Strom-Erzeugungsanlagen mit Speichern geben; Verbraucher werden auch Erzeuger und nehmen am Energiehandel teil (sog. „Prosumer“). Dadurch entstehen neue Geschäfts- und Verrechnungsmodelle, die zusammen mit intelligenten Netzen den Verbrauch zunehmend an das Angebot anpassen (sog. „Demand Side Management“). Auch neue Verkehrskonzepte für Nah- und Fernverkehr und für die Entwicklung der Ballungszentren sind erforderlich.

### Wie viel Speicherkapazität werden wir benötigen?

Wenn vom Wetter und vom Sonnenstand abhängige, intermittierende Energieerzeugungsquellen wie Windkraft und Photovoltaik unsere Energieversorgung dominieren, wird die Energiespeicherung zu einer Schlüsselfrage. Kurzzeitspeicherung von Minuten bis zu wenigen Tagen sowie Langzeitspeicherung von Wochen bis zu mehreren Monaten sind gleichermaßen wichtig (**Abb. 3**). Kurzzeitspeicher sollen vor allem das Netz stabilisieren sowie Erzeugungs- und Nachfragespitzen kappen. Sie können dazu beitragen, manche Systemkomponente (z. B. Elektrolyseure oder Klein-PV- und Windanlagen) ohne Subventionen rentabel zu machen. Als elektrische Kurzzeitspeicher kommen Batterien (Akkumulatoren) auf Basis von Alkali-Metallen oder Zink sowie Redox-Flow-Batterien infrage. Wärmespeicher beruhen auf den physikalischen Prinzipien Temperaturerhöhung („sensible“ Speicher), Phasenumwandlung („Latentwärme“) oder thermochemischen Prozessen (z. B. Sorptionsspeicher) und lassen sich bezüglich Kapazität, Temperaturbereich, Kosten und Einsatzbereich optimieren.

Langzeitspeicher gleichen saisonale bzw. wetterbedingte Schwankungen aus, die zum Beispiel zu verminderter Sonneneinstrahlung, langen Kälteperioden oder stabilen Hochdrucklagen mit Schwachwinden führen. Diese so genannte kalte Dunkelflaute kann Wochen andauern und die Stromerzeugung von Wind- und PV-Anlagen stark verringern. Untersuchungen zeigen, dass auch ein (bislang utopisches) europaweites Verbundnetz dieses Problem nur mildern, aber nicht lösen würde [6]. Langzeitspeicher oder Reservekraftwerke sind große Herausforderungen einer Energieversorgung, die vor allem auf intermittierenden Quellen basiert. Sie verursachen einen Teil der Gesamtkosten der Energiewende, die eigentlich aufgrund rapider sinkender Preise für PV- und Windanlagen zurückgehen sollten.

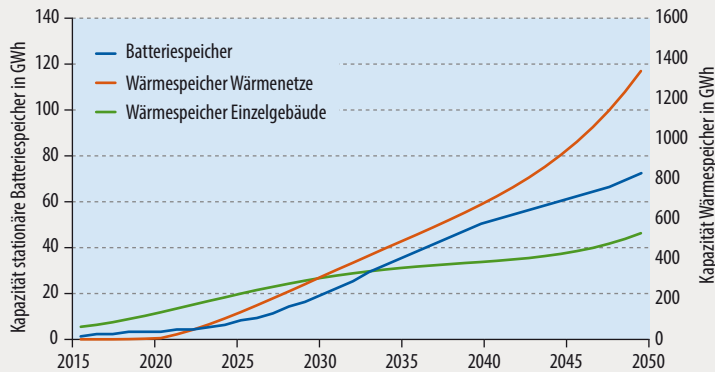
### Ziele der deutschen Energiewende

- Reduktion der Treibhausgase bei Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit: bis 2020 um 40 %, bis 2030 um 55 %, bis 2040 um 70 % und bis 2050 um 80 bis 95 % (bezogen auf 1990).
- Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 50 % bis 2050 (bezogen auf 2008)
- Reduktion des Energieverbrauchs im Transportbereich um 40 % bis 2050 (bezogen auf 2010)
- Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs um 25 % bis 2050 (bezogen auf 2010)
- Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtstromverbrauch:<sup>\*)</sup>  
2020: 35 %, 2030: 50 %, 2040: 65 %, 2050: 80 %
- Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch:  
2020: 18 %, 2030: 30 %, 2040: 45 %, 2050: 60 %
- Stufenweise Abschaltung aller Kernkraftwerke bis 2023

Die meisten Ziele wurden 2010 beschlossen und sind heute noch gültig: z. B. Klimaschutz 2050, [bit.ly/2q9Wx5M](http://bit.ly/2q9Wx5M), oder Klimaschutz in Zahlen: [bit.ly/2QhSjia](http://bit.ly/2QhSjia).

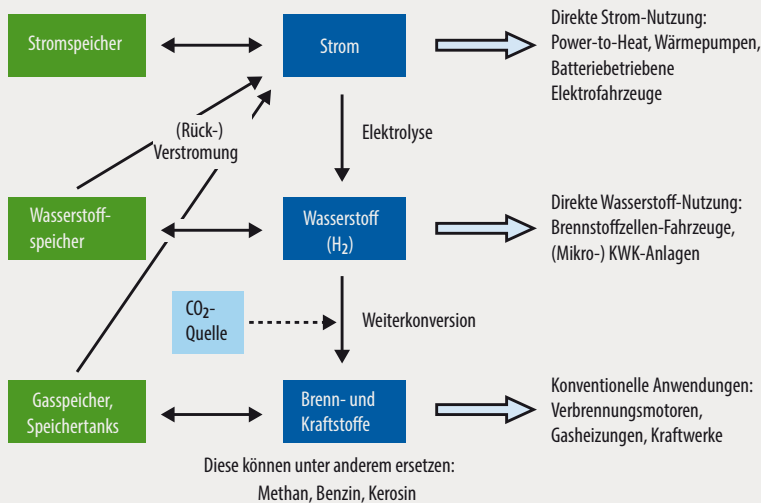
<sup>\*)</sup> Im Koalitionsvertrag sowie durch die „Kohle-Kommission“ ist eine Reduktion um 65 % inzwischen für 2030 als Ziel formuliert.





**Abb. 3** Zeitlicher Verlauf der installierten Kapazitäten von stationären Batteriespeichern (linke Achse) sowie von Wärmespeichern in Einzelgebäuden und in Wärmenetzen (rechte Achse); Modellrechnungen für eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 85 Prozent.

Langzeitspeicherung ist vor allem durch die Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Gasen wie Methan und Flüssigkeiten möglich, die dann rückverstromt oder anderweitig im Energiesystem oder in der Industrie verwendet werden. Jede Umwandlung ist mit signifikanten „Energieverlusten“ verbunden, welche die Gesamteffizienz der Prozessketten reduzieren und die Kosten erhöhen. In manchen Zeiten erzeugen aber Wind und Sonneneinstrahlung riesige Strommengen, die sich nicht unmittelbar verwenden lassen (Überschussstrom) und die bereits heute (meist aufgrund unzureichender Leitungskapazitäten) reduziert oder abgeschaltet („abgeregelt“) werden müssen (2016: rund 5 TWh). Wenn wir Windkraft und Photovoltaik weiter stark ausbauen, werden die Mengen an Überschussstrom drastisch ansteigen, sodass eigentlich viel „Strom zum Nulltarif“ für die Wasserstoff-Elektrolyse zur Verfügung stehen sollte. Pufferung durch Kurzzeit-Stromspeicher kann dabei helfen, die Elektrolyseure mit möglichst hohen Laufzeiten zu betreiben (**Abb. 4**).



**Abb. 4** In einem Energiesystem, das wesentlich auf intermittierenden erneuerbaren Energien basiert, lässt sich Strom in Verbindung mit Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern einsetzen.

## Brauchen wir dann noch regelbare thermische Kraftwerke zur Stromerzeugung?

Leider ja. Zur Stromerzeugung werden regelbare thermische Kraftwerke nötig sein. Die kalten Dunkelflauten und die verstärkte Nutzung von Strom als Energieträger führen dazu, dass thermische Stromerzeuger wie Blockheizkraftwerke, Gasturbinen, Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke oder Brennstoffzellen mit etwa der gleichen Kapazität wie heute (~ 100 GW) bereitstehen müssen. Allerdings werden diese nur noch einige hundert bis wenige tausend Stunden pro Jahr benötigt [2, 3], was andere Vergütungsmodelle als heute erfordert. Wie viel Kapazität 2050 tatsächlich als Reserve vorhanden sein muss und ob diese Kraftwerke (teilweise) mit Wasserstoff oder synthetischen Gasen betrieben werden können, hängt stark von der tatsächlichen Entwicklung des Energiesystems und der europäischen Zusammenarbeit ab.

## Welche Kosten sind absehbar?

Die Ergebnisse unserer Abschätzungen sind sicher mit großen Unsicherheiten behaftet, weil die Entwicklung der kumulativen Gesamtkosten des Energiesystems sehr stark von den tatsächlich ins Auge gefassten Zielen und Zeitskalen, den politischen Rahmenbedingungen, technischen Fortschritten und internationalen Märkten abhängen. Dennoch geben die Zahlen einen Eindruck von der Dimension der Herausforderung: Wenn wir sofort starten, kostet der Umbau für das Ziel einer 85-prozentigen Reduktion bis 2050 etwa 2 Billionen Euro mehr, als wenn wir so weiter machen wie bisher und die Reduktionsziele weit verfehlen. Eine 60-prozentige Reduktion ist mit sehr geringen systemischen Mehrkosten, eine 90-prozentige Reduktion dagegen mit deutlich höheren Mehrkosten von über 3 Billionen Euro verknüpft. Auf das Jahr umgerechnet relativieren sich diese auf den ersten Blick sehr hohen Mehrkosten merklich: Für eine Reduktion um 85 Prozent sind es 60 Milliarden Euro bzw. zwei Prozent des Bruttoinlandsprodukts. Auch sind die Vorteile eines solchen Umbaus – beispielsweise die wirtschaftliche Entwicklung aufgrund hoher Investitionen, Exporte, weniger Klimaschäden etc. – nicht gegengerechnet, zumal sie wesentlich schwerer zu quantifizieren sind. Wenn wir den großen Umbau jedoch weiter verzögern, aber die gleichen Klimaziele anstreben, wird es deutlich teurer.

## Reichen die derzeitigen Maßnahmen aus?

Die Antwort ist eindeutig nein. Mit den Hunderten von sektorspezifischen Gesetzen und Regelungen der Vergangenheit, die sich zum Teil gegenseitig behindern oder konterkarieren, sind die Ziele nicht zu erreichen. Ein Beispiel sind die viel zu hohen Stromkosten, die eine Systemoptimierung über eine bessere Vernetzung der Sektoren verhindern und den Einbau von Wärmepumpen unrentabel machen. Auch die kleineren Korrekturen, die beständig am vorhandenen hochkomplexen Regelsystem angebracht werden, verbessern die Situation nicht wirklich. Sie verunsichern alle Beteiligten und führen dazu, dass der erforderliche Umbau

nicht startet, weil zum Beispiel die dringend erforderlichen Investitionen nicht getätigt werden.

Über die sinnvollste Abhilfe sind sich derzeit die meisten Fachleute einig: ein einheitlicher Preis auf alle CO<sub>2</sub>-Emissionen. Das klingt einleuchtend, denn die CO<sub>2</sub>-Emissionen gilt es zu reduzieren. Dennoch wird es bisher so nicht praktiziert. Das vorhandene ETS-System (Emissions Trading System) zum Handel von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten ist zwar im Prinzip ein guter Ansatz. Es betrifft bisher aber nicht einmal die Hälfte aller CO<sub>2</sub>-Emittenten, ist zu großen Schwankungen unterworfen und hatte zunächst viel zu niedrige Zertifikatpreise, weil zu viele Zertifikate auf dem Markt waren und ein Überangebot die Preise drückt. Ein einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis, ob als planbar steigende untere Schranke eines Korridors im ETS-System oder als nationale CO<sub>2</sub>-Steuer angesetzt, aber ausgedehnt auf alle CO<sub>2</sub>-Emissionen, könnte heilsam wirken. Bald wären Kohlekraftwerke aus marktwirtschaftlichen Gründen nicht mehr rentabel, sodass die Betreiber sie „freiwillig“ abschalten. Viel mehr Effizienzsteigerungs- und Sparmaßnahmen wären ökonomisch sinnvoll und würden umgesetzt. Und Investitionen in den Umbau des Energiesystems wären besser planbar und würden getätigt. Strom- und Energiesteuer könnten entfallen; die Regierung müsste sich manche Fortschritte wie den Ausstieg aus der Braunkohle nicht mehr mühsam erkämpfen und teuer erkaufen. Stattdessen könnte sie die Einnahmen aus den CO<sub>2</sub>-Abgaben einsetzen, um strukturelle Herausforderungen sowie wirtschaftliche oder soziale Schiefen gezielt zu lösen.

Das alles ist nicht wirklich neu: CO<sub>2</sub>-Mindestpreise wurden bereits vor einiger Zeit und mit Erfolg unter anderem in Großbritannien und Schweden eingeführt.<sup>3)</sup> Nach Einführung eines Grundpreises von 18 britischen Pfund (plus Zertifikatpreis) pro emittierter Tonne CO<sub>2</sub> sank die Stromerzeugung aus Kohle in Großbritannien innerhalb von fünf Jahren von etwa 150 TWh auf unter 30 TWh. Das Vereinigte Königreich avancierte dadurch von Platz 20 auf Platz 7 unter den 33 reichsten Nationen bezüglich CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromerzeugung. Schweden hat heute einen besonders hohen CO<sub>2</sub>-Preis: Er wurde bereits 1991 eingeführt und seither beständig auf heute umgerechnet etwa 110 Euro erhöht. Während dieser Preis im Transportbereich keine deutlichen Verbrauchsrückgänge auslöste, sank der Verbrauch von Niedertemperatur-Wärme um einen Faktor 8. Würde es sich nicht lohnen, sich diese Beispiele genauer anzuschauen und entsprechend angepasst auf das deutsche Energiesystem zu übertragen?

Eine sukzessive Korrektur und Vereinfachung des umfangreichen Regelungssystems müssen wir zügig in Angriff nehmen, um die stärkere Kopplung der Energiesektoren zu ermöglichen. Damit ließen sich leichter neue Lösungswege finden, die derzeit durch Detailsteuerung und eine kleinteilige Subventions- und Sanktionspolitik verhindert werden.

## Wie viel Zeit haben wir noch?

Unsere Untersuchungen zeigen eindeutig, dass wir den Umbau unseres Energiesystems deutlich beschleunigen müssen, um die ehrgeizigen Ziele (z. B. eine 80 bis 85-prozentige Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050) zu erreichen und die Kosten zu begrenzen. Viele Investitionen in Anlagen und Infrastruktur (Stromleitungen, Speicher, Elektromobilität, Wärmenetze, Wohnhaussanierung etc.), Veränderungen von Verkehrskonzepten und von Verbraucherverhalten erfordern lange Vorlaufzeiten und Planungszeiträume. Die Lebensdauern bzw. Amortisationszeiträume von Gebäuden, Kraftwerken und Anlagen liegen bei 30 bis 50 Jahren, von Heizungsanlagen bei 20 bis 25 Jahren und lediglich von Fahrzeugen bei 10 bis 20 Jahren, sodass noch mehrere Erneuerungszyklen bis 2050 zu erwarten sind. Wenn das Regelungssystem nicht zügig umgebaut wird, werden in den nächsten Jahren Investitions- und Umbauentscheidungen nicht oder im Sinne einer CO<sub>2</sub>-Vermeidungsstrategie falsch getroffen. Dabei vergeuden wir wertvolle Zeit. Außerdem muss unsere Energiewende sehr viel europäischer bzw. internationaler werden, und internationale Einigungsprozesse brauchen bekanntlich sehr viel Zeit – Zeit, die wir eigentlich nicht mehr haben.

### Literatur

- [1] IPCC, Special Report, Global Warming of 1.5 °C, Oktober 2018, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- [2] Stellungnahme des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“, Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende (2017), [bit.ly/2RqnSjj](http://bit.ly/2RqnSjj)
- [3] Analyse des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“, Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (2017), [bit.ly/2Sn3blt](http://bit.ly/2Sn3blt)
- [4] B. Erlach, H.-M. Henning, C. Kost, A. Palzer und C. Stephanos, Optimierungsmodell REMod-D, Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft (2018), [bit.ly/2Q435Nx](http://bit.ly/2Q435Nx)
- [5] Stellungnahme des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“, Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik – Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung (2019)
- [6] F. Wagner, Eur. Phys. J. Plus 129, 219 (2014)

## Die Autoren



**Eberhard Umbach** (FV Oberflächenphysik, Chemische Physik und Polymerphysik) studierte Physik an der TU München, wo er auch promoviert und habilitiert wurde. Von 1987 bis 1993 war er Professor an der Uni Stuttgart, von 1993 bis 2007 an der Uni Würzburg. 2007 wurde er Vorstandsvorsitzender des Forschungszentrums Karlsruhe, 2009 Präsident des Karlsruher Instituts für Technologie. Seit

2013 ist Umbach im Ruhestand.

**Hans-Martin Henning** promovierte 1993 an der Universität Oldenburg in Physik und ist seit 1994 am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg in verschiedenen Funktionen tätig. 2017 wurde er zum Institutsleiter des Fraunhofer ISE berufen.



**Prof. Dr. Eberhard Umbach**, Bachsweg 15, 97288 Teilheim und **Prof. Dr. Hans-Martin Henning**, Fraunhofer ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

3) A carbon tax killed coal in the UK. Natural gas is next, [bit.ly/2AQMlzc](http://bit.ly/2AQMlzc) and The Swedish CO<sub>2</sub> tax – an overview, [bit.ly/2RQQ4ff](http://bit.ly/2RQQ4ff)