

Energiewende 2.0

Robert Schlögl*

Energiewende · Grüne Chemie · Industrielle Chemie ·
Klimaschutz · Umweltchemie

Die Energiesysteme der Welt sind einem stetigen Wandel unterworfen. Dieser folgt aus Entwicklungen des Rohstoffangebotes, technologischen Entwicklungen bei Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie und aus sich verändernden gesellschaftlichen sowie wirtschaftlichen Ansprüchen. Selten gab es den Versuch, auf diese Entwicklung bewusst Einfluss zu nehmen. Genau dies hat sich die deutsche „Energiewende“ als nationaler Alleingang zum Ziel gesetzt. Die Reaktorkatastrophe im Jahr 2011 hat diesem Weg durch den Atomkraftausstieg einen Impuls gegeben, sie hat ihn jedoch weder verursacht noch verändert.

Die Energiewende 1.0 sieht vor, zusätzlich zum Atomausstieg in einer Doppelstrategie aus Technologieförderung für erneuerbare Energien (EE) und gesetzlichen Maßnahmen in den Verbrauchssektoren Wärme und Mobilität einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Dies soll durch CO₂-neutrale Bereitstellung von elektrischer Energie und Absenkung des Primärenergiebedarfes über das gesamte Energiesystem hinweg erreicht werden. Dieser Ansatz ist dann sinnvoll im Hinblick auf das letzte Ziel Klimaschutz, wenn es gelingt, zumindest auf EU-Ebene ähnliche Maßnahmen einzuleiten und wenn das Beispiel in Form von Technologien und als Handlungsempfehlung an die Politik international exportiert werden könnte. Die inzwischen erfolgte, breite Diskussion hat Zweifel an diesen Annahmen geweckt und zusammen mit einer öffentlich sehr verengten Wahrnehmung der „Kosten der erneuerbaren Energien“ die anfänglich breite Zustimmung zur Energiewende erheblich abgeschwächt. Ein „Masterplan“ wird gefordert.

Der dynamische Charakter^[1] des Energiesystems und das Einwirken vieler Faktoren, die von einem nationalen Masterplan nicht steuerbar sind, machen einen derartigen Plan illusionär. Gebraucht wird vielmehr ein geordneter und andauernder Diskurs in der Gesellschaft über die Entwicklung des Energiesystems, aus dem berechenbar funktionierende Rahmenbedingungen durch die Politik abgeleitet werden. Nationale oder gar regionale Alleingänge sind dabei dem Ziel „Klimaschutz“ abträglich, weil ihre Regelungsdichte die nötige Flexibilität für zumindest europäische Lösungen ein-

schränkt, ohne die keine nennenswerten quantitativen Verbesserungen im Klimaschutz erreichbar sind. In diesem Fall verpuffen die gut gemeinten und oft erheblichen wirtschaftlichen Anstrengungen.

Ständige Überprüfung und Kontinuität in der Lenkung der über lange Zeiten erfolgenden Wandlung des Energiesystems sind Voraussetzungen für das notwendige wirtschaftliche Engagement und die dauerhafte Teilhabe der Bevölkerung, welche die eigentliche Zielgruppe der Energiewende sein muss. Die Industrie nimmt derzeit eine abwartende bis ablehnende Haltung ein und beklagt Belastungen – sie bemüht sich aber nicht erkennbar, konstruktiv in den Prozess einzugreifen, der enorme Chancen mit sich bringt, wenn er auf realistische Ziele hin bezogen und nicht ideologisch gesteuert wird. Derzeit herrschen punktuelle und technologiebezogene Regelwerke vor, die unerwünschte systemische Antworten wie erhöhte CO₂-Emissionen trotz erheblicher EE-Strombereitstellung bewirken, und die breite Diskussion verbeißt sich in Details wie derzeit mit der Kosten- und Marktsituation in der Stromversorgung.

Abbildung 1 gibt zu dieser Debatte einige Orientierungsdaten. Der Energiemarkt (Abbildung 1 A) für Privatkunden ist wesentlich größer als der für Industriekunden. Auf beide Märkte wirkt die EEG-Umlage mit Signifikanz ein. Allerdings ist die Stromrechnung für Industriekunden nur in einer überschaubaren Anzahl von Fällen, z. B. in der chemischen Industrie, größer als 3 % der Produktionskosten. Dies wurde mit den Befreiungen von der EEG-Umlage intensiv thematisiert. Auch für viele Privatkunden ist die Stromrechnung (Abbildung 1 B) ein untergeordneter Betrag neben anderen Ausgaben für Energie. Die Kosten des Stromes und seiner Verteilung für Privatkunden (Abbildung 1 C) sind etwa gleich hoch wie die anteiligen Steuern und Abgaben darauf. Man erkennt, dass die Stromkosten ein erkennbarer, aber untergeordneter Faktor im Energiesystem sind und dass sich die Diskussion daher wieder übergeordneten Aspekten der Energiewende annähern sollte. Eine solche Erweiterung der Diskussion und auch des Handelns auf die systemische Ebene der Energieversorgung ist mit der Bezeichnung „Energiewende 2.0“ gemeint. Die internationale Gemeinschaft, die das Fortschreiten der Energiewende in Deutschland intensiv beobachtet, wäre enttäuscht, wenn wir bei der derzeitigen Situation stehen blieben, was sich sicher nachteilig auf den Klimaschutz auswirken würde.

Eine Anregung für die Diskussion könnte die Analyse der Folgen sein, die sich aus der Tatsache ergibt, dass Deutschland nicht nur sehr ehrgeizige Ziele bei der Reduktion von

[*] Prof. Dr. R. Schlögl
Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Stiftstraße 34-36, 45470 Mülheim a.d. Ruhr (Deutschland)
und
Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft
Faradayweg 4-6, 14195 Berlin (Deutschland)
E-Mail: acsek@fhi-berlin.mpg.de

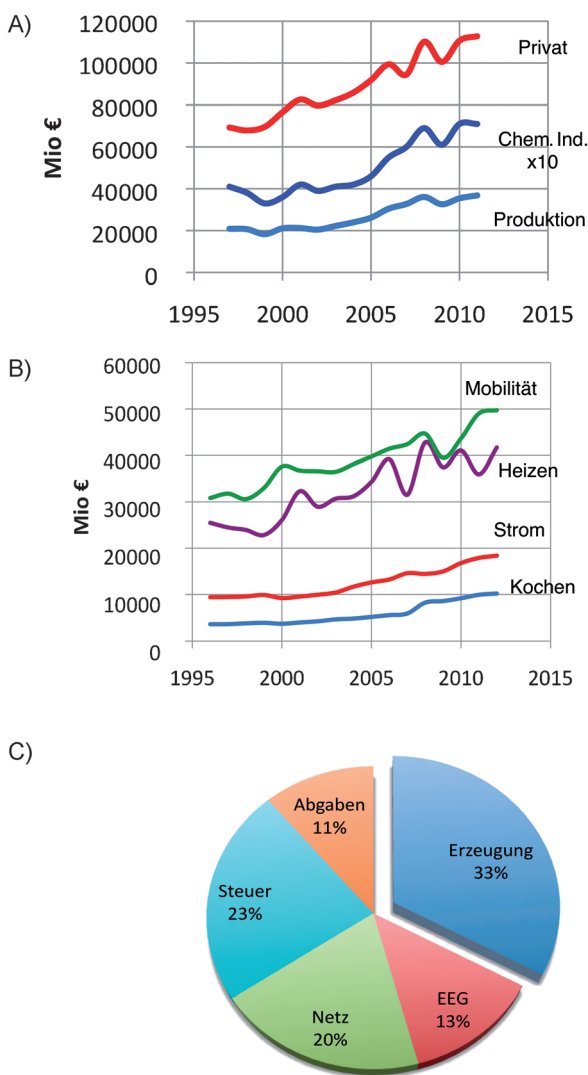


Abbildung 1. Kennzahlen zum deutschen Strommarkt als zeitliche Entwicklung seit 1990 (Quelle: BMWI Datenbank <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energie-daten.html>). A) Ausgaben für Energie in Euro pro Jahr für die produzierende Industrie, die chemische Industrie ($\times 10$) und die Privathaushalte. B) Aufteilung der Energiekosten nach Verwendungsarten für die privaten Verbraucher. C) Kostenbestandteile für private Stromkunden in Berlin (Quelle: Vattenfall).



Robert Schlögl ist Direktor am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin und Gründungsdirektor des Max-Planck-Instituts für Chemische Energiekonversion in Mülheim a.d. Ruhr. Er ist Partner in zahlreichen europäischen und internationalen Verbundprojekten auch unter Beteiligung industrieller Partner und einer der Initiatoren des Forschungsverbundes MAXNET, in dem verschiedene Max-Planck-Institute gemeinsam Konzepte einer nachhaltigen Energieversorgung entwickeln. Er ist Mitglied in zahlreichen in- und ausländischen Gremien.

Treibhausgasen verfolgt, sondern gleichzeitig dazu aus der Kernenergie als einer CO_2 -armen Stromerzeugungstechnologie aussteigt. Damit ergibt sich ein wesentlich verstärkter Zwang zur Integration der EE in das gesamte Energiesystem, um dadurch schnellstmöglich Einsparpotentiale für CO_2 auch außerhalb des Stromsektors zu erreichen.

In Abbildung 2 ist gezeigt, welche Auswirkungen die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien, der nicht kontinuierlich, sondern je nach Wetterlage verfügbar ist, auf ein Stromsystem^[2] hat. Man erkennt, dass die Beiträge der EE

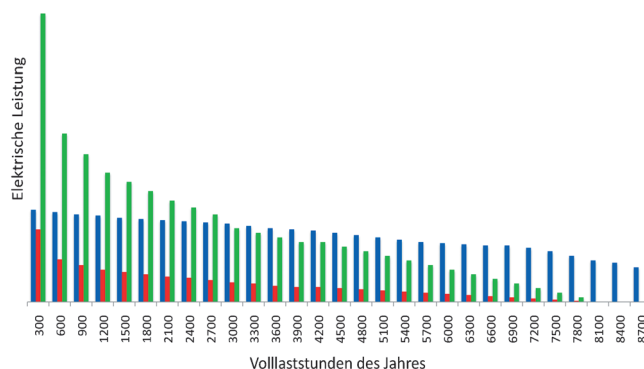


Abbildung 2. Schematisches Lastprofil Deutschlands (Maximallast ca. 80 GW). Blau: Lastbedarf, rot: Einspeisung EE etwa heute, grün: Einspeisung EE etwa 2035. Abszisse: Volllaststunden im Jahr. Das Profil der EE ergibt sich aus dem stabil angenommenen Mix von Wasser, Wind, Photovoltaik und Bioenergie.

heute bereits erheblich sind, sie folgen allerdings in keiner Weise der Verbrauchskurve. Dies führt zur Notwendigkeit eines zunehmend flexibilisierten Einsatzes des heutigen fossilen Kraftwerksparks, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Mit dem in der Energiewende 1.0 vorgesehenen, erheblichen Zuwachs der EE wird die Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage erheblich größer. Dem enormen Überschuss zu allerdings begrenzter Stundenzahl steht ein ebenfalls erheblicher Fehlbedarf gegenüber. Dieser macht die Fortexistenz eines konventionellen Kraftwerksparks notwendig und führt auf lange Zeit zur Koexistenz zweier Stromerzeugungssysteme bei gleichbleibendem (oder wie geplant vermindertem) Strombedarf. Die Folgen des derzeit nicht verhinderten „Gegeneinanders“ der Kraftwerksparks erkennen wir am erhöhten CO_2 -Ausstoß in Deutschland.

Diese Doppelstruktur und weitere Belastungen aus dem notwendigen Netzausbau dürften auch bei mäßigen Kosten für die CO_2 -Emission aus dem EU-Emissionshandel dazu führen, dass auf lange Sicht nicht die Methode einer Speicherung und Rückverstromung die wirtschaftlich tragfähige Lösung sein wird, sondern dass fossile Quellen^[3] teilweise weiterhin an der Stromversorgung beteiligt sein werden. Im Sinne einer auf alle Ziele hin optimierten Entwicklung des Energiesystems kann dies eine sinnvolle Lösung sein, wenn der Überschussstrom aus erneuerbaren Quellen effektiv und wirtschaftlich zur Minderung von CO_2 -Emissionen an anderen Stellen im System eingesetzt wird. Wie dies beispielhaft geschehen könnte, wird in der Folge skizziert. Damit soll ein Beitrag zur geforderten Diskussion über systemische Fort-

entwicklungen der Energiewende geleistet werden, die aus dem überbetonten Bezug auf das Teilsystem Strom herausgeführt werden muss.

Für Stromüberschüsse, die nur kurzzeitig anfallen, sind preiswerte thermische Anwendungen, etwa in zentralen Heizsystemen, sinnvoll, da mit geringen Investitionskosten direkte CO₂-Einsparungen im Wärmeversorgungssektor erzielt werden. Der Wert der freien Energie „Strom“ sollte allerdings zu erheblichen Teilen in hochwertigen Produkten durch chemische Energiekonversion genutzt werden. Gespeichert in chemischen Bindungen kann primäre Elektrizität beispielsweise im Mobilitätssektor genutzt werden. Allerdings sind wir von derartigen Lösungen, die von der chemischen Industrie besonders gefordert werden, noch weit entfernt. Eine Nutzung der EE in der Elektromobilität wird einen Teilbeitrag leisten, der in Deutschland jedoch quantitativ begrenzt bleiben dürfte. Selbst dafür hat die (chemische) Industrie noch erhebliche Aufgaben zu lösen, um die erforderlichen Batterien leistungsfähig und preiswert zur Verfügung zu stellen.

Das Schema eines möglichen derartigen Systems ist in Abbildung 3 dargestellt. Keinesfalls ist dies die einzige Lösung oder sollte gar als der gewünschte Masterplan verstanden werden.

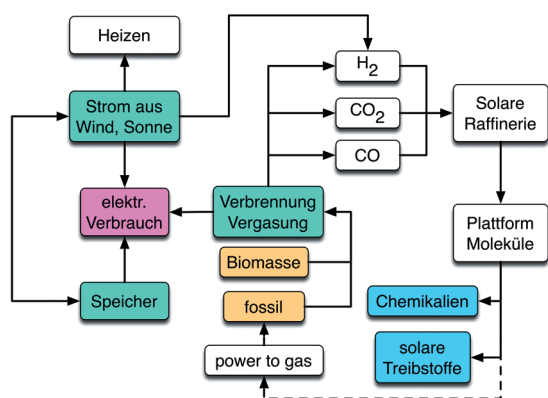


Abbildung 3. Schema einer Kopplung von regenerativer volatiler Elektrizität mit dem übrigen Energiesystem. Die Stromversorgung wird als Mischung erneuerbarer und fossiler Primärquellen angenommen, etwa wie sie in Abbildung 2 (grüner Fall) dargestellt ist. Es wird von der Verfügbarkeit erheblicher Mengen überschüssiger Primärelektrizität ausgegangen. Die Systemsteuerung würde bedarfsgeführt nach dem Stromverbrauch erfolgen. Konventionelle thermische Kraftwerke würden durch einen Vergaser ergänzt, der entweder Wärme oder Synthesegas liefern kann und flexibel den Lastanforderungen angepasst wird.

In diesem Schema wird davon ausgegangen, dass in Zukunft fossile und bio-basierte Energieträger in Kombinationsanlagen entweder vergast oder verbrannt werden, um im Verbund mit den EE je nach Lastbedarf entweder Synthesegas oder Strom zu liefern. In einer „solaren Raffinerie“^[4] werden nachfolgend entweder aus Synthesegas oder aus gespeichertem solarem Wasserstoff und CO₂ Plattformmoleküle wie Methanol oder Methan hergestellt, oder Synthesegas wird direkt in flüssige Treibstoffe umgewandelt. Eine zukünftig wichtige, aber derzeit noch nicht wirtschaftlich gang-

bare Anwendung ist die Verwendung als Rohstoffquelle der chemischen Industrie.

Die Nutzung von aus fossilen Quellen hergestelltem Methanol als universelle Plattform für die Energieversorgung wurde bereits vor 40 Jahren sehr weit entwickelt. Eine heute sehr nützliche zusammenfassende Darstellung dazu findet sich in dem Buch von Asinger.^[5] Später wurde die Vorstellung von Olah^[6] propagiert, um den CO₂-Kreislauf zu schließen. Auch Kombinationen aus den Synthesereaktionen für Methanol, der Sabatier-Reaktion und der Fischer-Tropsch-Reaktion mit jeweils optimierten Katalysatoren wären vorstellbar, um unter wechselnden Lastbedingungen immer zu einem Vollumsatz von Wasserstoff zu gelangen. Methan kann entweder als Kraftstoff verwendet werden oder über das „power-to-gas“-Schema gespeichert oder rückverstromt werden. Man erkennt eine Vielzahl von Verwendungsmöglichkeiten von regenerativ erzeugter Primärelektrizität, die das gesamte Energiesystem verknüpfen kann. Damit entstehen zahlreiche Flexibilisierungsoptionen, die je nach Lastsituation und ökonomischen Randbedingungen sicherstellen können, dass eine maximale CO₂-Reduktion unter wirtschaftlichen Bedingungen möglich ist.

Einige Zahlen mögen zeigen, wie solch ein Verbund funktionieren kann. Die weltgrößte Anlage zur Erzeugung von Treibstoff aus Synthesegas (PEARL in Qatar) produziert mit ca. 5000 Tonnen pro Tag etwa 5 % des täglichen deutschen Kraftstoffverbrauches. Würde man in dieser Dimension synthetischen Kraftstoff in Deutschland aus CO₂ und regenerativem Überschussstrom erzeugen und würde man statt gewöhnlichem Diesel einen Oligo-Ether (Gemisch von Oximethylenether 3 und 4^[7]) als einfach herzustellenden und vollmischungsfähigen Ersatz mit etwa der halben Energiedichte von Diesel vorsehen, so würde man zwei Anlagen mit 5000 Tagedestonnen Kapazität benötigen. Diese würden ca. 16.000 Tonnen CO₂ am Tag benötigen und zur Erzeugung des notwendigen regenerativen Wasserstoffes etwa 85 GWh Strom pro Tag aufnehmen. In diesen groben Zahlen sind keine Werte für Eigenverbrauch und Hilfsfunktionen enthalten. Auf diesem Weg kann ein wirtschaftlich wertvolles Produkt hergestellt werden, das von vorhandenen Märkten leicht aufgenommen werden kann. Zudem wird eine entsprechende Menge an Emissionen durch Einsparung der Verbrennung fossilen Kraftstoffes vermieden. Ein Nebennutzen von „Designer-Kraftstoffen“, die eine chemisch homogene Struktur aufweisen, ist ihre partikelfreie Verbrennung; allerdings würden erheblich größere Mengen benötigt, um diesen Effekt in einer Fahrzeugflotte sinnvoll nutzen zu können: Die Gewinnung von EE würde durch den Bedarf an chemischen Energiespeichern und nicht mehr durch den Strom angetrieben werden.

Die Zahlen zeigen, welche Dimensionen in der nachhaltigen Energiewandlung zu bewältigen sind. Vom Standpunkt der Grundlagenforschung aus betrachtet halten die dazu relevanten Prozesse, mit derzeit bekannten Verlusten von bis zu 50% der freien Energie, immer noch erhebliche Herausforderungen für das Verständnis und ein rationales Design, das kausal im Verständnis begründet ist und nicht phänomenologisch durch Korrelation von Material und Funktion entsteht, bereit. Nur derartiges Wissen kann zumindest auf län-

gere Zeit gesehen die optimale Effizienz in diese sehr großen technisch-chemischen Prozesse bringen.

Eine Umsetzung der in Abbildung 3 angedeuteten Prozesskette erfordert umfangreiche systemische, naturwissenschaftliche und technische Forschungsarbeiten, ehe mit einer konkreten Planung begonnen werden kann. Abgesehen von der gesamten Effizienzkette entlang der Prozesse von der EE-Gewinnung bis zur Treibstoffbereitstellung sind vor allem Fragen der Stabilität und der Investitionskosten bei beschränkten Laufzeiten (Abbildung 2) kritische Punkte, die eine Realisierung derzeit riskant machen. Die Umsetzung von CO₂ mit Wasserstoff^[8] und die nachfolgende Veredlung enthalten keine wesentlichen unbekannten Schritte. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die Realisierung jedes dieser Schritte in Großanlagen problemlos gelingt, vor allem, wenn man die Rückwirkungen ökonomischer Randbedingungen auf die einzusetzende Technologie bedenkt: Einige Schritte jeder der erwähnten CO₂-Umwandlungen sind komplexe Folgen von Stoffumwandlungen und Stofftrennungen, die wesentlich einfacher sein könnten, wenn wir über Verfahren verfügten, die direkt zum Zielprodukt unter Vollumsatz der Ausgangsverbindungen verlaufen würden. (Beispiele hierfür sind die Methanisierung und die Fischer-Tropsch-Synthese von flüssigen Kraftstoffen.) Eine wirtschaftliche Elektrolyse im erforderlichen Umfang als intermittierende Last dürfte ebenfalls noch erhebliche Hürden^[9] für Forschung und technologische Entwicklung mit sich bringen. Stabilität der Elektroden, Vermeidung von Edelmetallen, geeignete Membranen und produktionsgünstige Gesamtanordnungen sind relevante Themen für Grundlagenforschung wie für verifizierbare Demonstratoren, auf deren Leistungsdaten die Entwicklung großer Anlagen aufsetzen kann. Könnten wir die nachfolgenden katalytischen Schritte ebenfalls im Takt der Elektrolyse intermittierend betreiben – was derzeit nicht geht –, würden sich die entsprechenden Anlagen vereinfachen, da Zwischenspeicher überflüssig würden. Eine Realisierung des Schemas aus Abbildung 3 könnte bei entsprechender Konzentration von Ressourcen im Zeitraum bis ca. 2035 erreichbar sein.

Das Beispiel zeigt, wie die Wissenschaften der Chemie, der Verfahrenstechnik und der Systemforschung mit der chemischen Industrie, den Energieversorgern, der elektrotechnischen Industrie und der Automobilwirtschaft zusammenarbeiten könnten, um systemisch günstige Lösungen zu erreichen. Insbesondere die chemische Industrie und der Anlagenbau könnten in einer derartigen branchenübergreifenden Anstrengung eine führende Rolle basierend auf ihren einschlägigen Erfahrungen übernehmen. In der chemischen Forschung scheint es wichtig, auch aufgrund der dargelegten Dimensionen sich nicht nur mit biomimetischen^[10] und durch Selbstorganisation unter milden Bedingungen stabilen Strukturen zu befassen, sondern verstärkt auch an der Lösung der alten Ziele^[11] der Gewinnung und Verwendung von Wasserstoff zu arbeiten. Die Natur kann mit ihrem Verzicht auf Edelmetalle^[12] ein wichtiges Vorbild für geeignete Ansätze der Materialwahl sein.

Natürlich stellt sich die Frage, ob die Komplexität der Entwicklungen, die hier angedeutet sind, wirklich erforderlich ist oder ob es einfachere Lösungen zur nachhaltigen

Gestaltung des Energiesystems gibt. Dazu definieren wir „Nachhaltigkeit“ in unvollkommener Weise als die Schließung von allen Stoffkreisläufen, die unsere Lebensumgebung erkennbar verändern. Dann müssen wir auf den Einsatz fossiler Energieressourcen und die Nutzung von Kohlenstoff als Energieträger jenseits der Möglichkeiten nachwachsender Rohstoffe verzichten, wenn wir das System wesentlich gegenüber Abbildung 3 vereinfachen wollen. Eine Wasserstoffwirtschaft, in der nur die Wasserspaltung als katalytischer Prozess vorkommt, zusammen mit einer katalytischen Umwandlung von Biomasse, könnte diese Anforderungen möglicherweise erfüllen. Die Kombination regenerativer Primärelektrizität mit Batterien und thermomechanischen Speichern würde dagegen nicht funktionieren: Wir benötigen immer chemische Energiespeicher sowohl aus Gründen der stofflichen Energieversorgung für Hochleistungsanwendungen als auch für den preisgünstigen Ausgleich der Nachfrage gegenüber dem Angebot an regenerativer Primärenergie. Damit bleibt die Kernaussage des Essays, dass eine Energiewende ohne Chemie und Katalyse^[13] nicht gelingen kann, erhalten, auch wenn man an der Option der hier dargestellten Realisierung nicht festhalten möchte.

Die bisherigen punktuellen und auf einen einzelnen Parameter fixierten Versuche zur Umsetzung sind weniger geeignet, um das Gemeinschaftswerk Energiewende in realistischen Zeiträumen von 30 Jahren planbar und kosteneffizient so umzusetzen, dass ein Optimum an Klimaschutz aus dem gesamten Energiesystem resultiert. Zu dessen Vorbereitung sind vielfältige Forschungsarbeiten nötig. Dabei ist eine Ausgewogenheit erforderlich zwischen grundlagenorientierter Forschung, der Suche nach neuartigen Lösungsmöglichkeiten und methodischer Forschung auf der einen Seite und dem aus der Wissenschaft gemeinsam mit der Industrie gesteuerten Prozess der Überführung von Konzepten in Technologien auf der anderen Seite. Dieser Prozess ist erst abgeschlossen, wenn Betriebserfahrungen aus Demonstratoren mit netzrelevanter Größe vorliegen. Dann kann die Gesellschaft in Kenntnis der technischen, wirtschaftlichen und nicht-technischen Konsequenzen über deren Einführung entscheiden. Zu diesem Prozess gehört auch eine Kostenbewertung, die im Unterschied zur derzeit geübten Praxis des Vergleiches geschätzter Kosten zum Gestehungspreis fossiler Elektrizität eine umfassende Beschreibung der Kosten neuer gegenüber herkömmlichen Technologien umfasst.

Die Einbeziehung der Gesellschaft in den Umbauprozess des Energiesystems wird durch Kommunikation und Transparenz bereits während der Forschungsphase erleichtert. Ohne eine Begleitung durch die Politik, die sich um einen informierten Dialog mit der Gesellschaft, um Internationalisierung und um ein geeignetes berechenbares Regelwerk kümmert, können die Ergebnisse der Forschung jedoch keine Früchte tragen.

Zitierweise: *Angew. Chem. Int. Ed.* **2015**, *54*, 4436–4439
Angew. Chem. **2015**, *127*, 4512–4516

[1] a) K. Riahi, A. Gruebler, N. Nakicenovic, *Technological Forecasting and Social Change* **2007**, *74*, 887–935; b) N. S. Lewis, *Science* **2007**, *315*, 798–801.

- [2] F. Wagner, *Eur. Phys. J. Plus* **2014**, 129.
- [3] A. Sharif, A. Almansoori, M. Fowler, A. Elkamel, K. Alrafea, *Int. J. Energy Res.* **2014**, 38, 363–373.
- [4] R. Schlögl, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, 50, 6424–6426; *Angew. Chem.* **2011**, 123, 6550–6553.
- [5] F. Asinger, *Methanol, Chemie- und Energierohstoff*, Springer, Berlin, **1985**.
- [6] a) G. A. Olah, A. Goepfert, G. K. S. Prakash, *J. Org. Chem.* **2009**, 74, 487–498; b) G. A. Olah, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, 44, 2636–2639; *Angew. Chem.* **2005**, 117, 2692–2696.
- [7] J. Burger, E. Ströfer, H. Hasse, *Chem. Eng. Res. Des.* **2013**, 91, 2648–2662.
- [8] G. Centi, E. A. Quadrelli, S. Perathoner, *Energy Environ. Sci.* **2013**, 6, 1711–1731.
- [9] G. Gahleitner, *Int. J. Hydrogen Energy* **2013**, 38, 2039–2061.
- [10] N. Cox, D. A. Pantazis, F. Neese, W. Lubitz, *Acc. Chem. Res.* **2013**, 46, 1588–1596.
- [11] a) I. C. Man, H.-Y. Su, F. Calle-Vallejo, H. A. Hansen, J. I. Martinez, N. G. Inoglu, J. Kitchin, T. F. Jaramillo, J. K. Nørskov, J. Rossmeisl, *ChemCatChem* **2011**, 3, 1159–1165; b) F. Schüth, R. Palkovits, R. Schlögl, D. S. Su, *Energy Environ. Sci.* **2012**, 5, 6278–6289.
- [12] a) K. Mette, A. Bergmann, J.-P. Tessonnier, M. Hävecker, L. Yao, T. Ressler, R. Schlögl, P. Strasser, M. Behrens, *ChemCatChem* **2012**, 4, 851–862; b) F. Jaouen, J. Herranz, M. Lefevre, J. P. Dodelet, U. I. Kramm, I. Herrmann, P. Bogdanoff, J. Maruyama, T. Nagaoka, A. Garsuch, J. R. Dahn, T. Olson, S. Pylypenko, P. Atanassov, E. A. Ustinov, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2009**, 1, 1623–1639; c) M. Götz, H. Wendt, *Electrochim. Acta* **1998**, 43, 3637–3644.
- [13] H. Arakawa, M. Aresta, J. N. Armor, M. A. Barteau, E. J. Beckman, A. T. Bell, J. E. Bercaw, C. Creutz, E. Dinjus, D. A. Dixon, K. Domen, D. L. DuBois, J. Eckert, E. Fujita, D. H. Gibson, W. A. Goddard, D. W. Goodman, J. Keller, G. J. Kubas, H. H. Kung, J. E. Lyons, L. E. Manzer, T. J. Marks, K. Morokuma, K. M. Nicholas, R. Periana, L. Que, J. Rostrup-Nielsen, W. M. H. Sachtler, L. D. Schmidt, A. Sen, G. A. Somorjai, P. C. Stair, B. R. Stults, W. Tumas, *Chem. Rev.* **2001**, 101, 953–996.

Eingegangen am 3. Juni 2014,
veränderte Fassung am 7. August 2014
Online veröffentlicht am 27. Februar 2015