



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Angew. Chem. 123 (2011) 6550-6553



Die Rolle der Chemie bei der Energiewende

Robert Schlögl

Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Faradayweg 4-6, D-14195 Berlin, Deutschland

* Corresponding author: e-mail acsek@fhi-berlin.mpg.de,

published online: 29 Jun 2011

Der Ruf nach regenerativen Energien als Ersatz für die Kernenergie wirft einige grundsätzliche Fragen für die Chemie als Wissenschaft auf. Die Chemie ist die Basiswissenschaft für Energieumwandlungsprozesse; dabei geht es um das Steuern von molekularen Energiebarrieren. Meist ist der Chemiker an deren stofflichen Konsequenzen interessiert, der Ingenieur dagegen an den energetischen Folgen der Umwandlung stofflicher Energieträger, typischerweise in Prozessen ihrer Totaloxidation. Die Steuerung chemischer Reaktionen geschieht über die Beeinflussung molekularer Energiebarrieren. Die Gesetze der Thermodynamik bestimmen die Einsatzmöglichkeiten der gewonnenen Energie. Die Chemie ist also schon heute von zentraler Bedeutung für unsere Energieversorgung, und sie wird es in weit größerem Maße für die zukünftige breite und nachhaltige Nutzung regenerativer Energie sein.

Diese Voraussage ergibt sich aus dem Ungleichgewicht zwischen der Energiebereitstellung durch regenerative Quellen und dem Energiebedarf, das trotz der moderierenden Wirkung von "intelligenten" Strom-Netzen nicht ohne stoffliche Speicherung auszugleichen ist. Hinzu kommen stoffliche Energieträger, die auf lange Sicht aus regenerativen Quellen synthetisiert werden müssen. Die Katalyse ist die grundlegende Methode für die Manipulation von Energiebarrieren, ist aber noch nicht weit genug entwickelt, um – basierend auf einem Minimum an Experimenten – Prozesse und Materialien konzipieren zu können, mit denen die notwendigen Energieumwandlungen effizient und nachhaltig gelingen. Es könnte sein, dass wieder einmal eine empirische Entwicklung einsetzen wird, deren theoretische Untermauerung zu spät für die technische Entwicklung nachgeliefert werden wird. Dies ist ein Argument für eine weitere Stärkung der Grundlagenforschung, damit deren Erkenntnisse rechtzeitig in die Entwicklung der Techniken einfließen können.

Wir betrachten Aspekte der deutschen Energieversorgung, um zu erkennen, welchen Beitrag die Chemie

dazu leisten kann und muss. Dabei sollte uns klar sein, dass alles, was heute erforscht wird, erst über eine Dekade später eine Wirkung auf der Skala nationaler Energieversorgung entfalten wird. Zudem sind die deutschen Verhältnisse nicht automatisch von allgemeiner Bedeutung, da in anderen Regionen andere Rahmenbedingungen gelten und somit auch andere Lösungen gefragt sind.

Wir benötigen dementsprechend nicht eine einzige Lösung, sondern gleich eine ganze Palette davon. Gesucht sind mehrere parallele und systemisch verbundene Lösungsansätze. In zeitlicher Staffelung werden so auf verschiedene Weise die Abhängigkeiten von der Kernspaltungsenergie und langfristig von fossilen Trägern verringert. Die Energieversorgung durch Kernfusion ist eine wichtige Alternative für energieintensive Anwendungen und könnte in chemische Prozesswege der regenerativen Energieversorgung eingekoppelt werden. Wir suchen Lösungen, die unter sich wandelnden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eine sichere Energieversorgung zu einem angemessenen Preis gewährleisten. Diese Lösungen dürfen die Gebote der Nachhaltigkeit nicht verletzen; weder der Verzicht auf Klimaschutz noch der raum-zeitliche Export nationaler Versorgungsprobleme sind akzeptabel. Da sich die Zeitspannen für die Etablierung entsprechender nachhaltiger Systeme in Dekaden bemessen, ist es dringend erforderlich, umgehend in einer "Forschungsoffensive", die von der Grundlagenforschung bis zu technischen Entwicklungen reicht, die nötigen Voraussetzungen zu schaffen und die nötige Zahl von Experten auszubilden.

In Abbildung 1 erkennen wir den gegenwärtigen "Energemix" zur Erzeugung von Elektrizität in Deutschland. Mehr als die Hälfte der Energieträger sind Kohlen, die andere Hälfte wird von der Kernenergie dominiert. Auch wenn wir die Kapazität der "alten" (vor 1980) Kernanlagen ersetzen können, so ist doch ein kurzfristiger Gesamtanstieg aus der Kernenergie nur schwer möglich,

wenn man die Bauzeiten von Energieanlagen und die oben genannten Bedingungen bedenkt. Dies gilt auch, wenn man berücksichtigt, dass die Daten aus Abbildung 1 nichts über die grundsätzlich vorhandenen Kapazitäten zur Energieerzeugung aus fossilen Ressourcen aussagen, die unter Berücksichtigung bekannter Ausbaupläne ausreichend wären. Es gilt zu entscheiden, die Kernenergie durch Energie aus fossilen Trägern, mit den entsprechenden zusätzlichen Emissionen von 60–120 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr (je nach Brennstoffmix Gas/Kohle), zu ersetzen. Dieser Wert ist für Deutschland bezogen auf die globale Treibhausgasemission gering (im Promillebereich), kann aber negative Beispielwirkung haben. Die Energiewende ist eine Trendwende, die noch viele langwierige wissenschaftlich-technische Anstrengungen nach sich ziehen muss, um die Kernenergie ganz zu ersetzen. Der Austausch aller fossilen gegen regenerative Energieträger ist ein Jahrhundertziel.

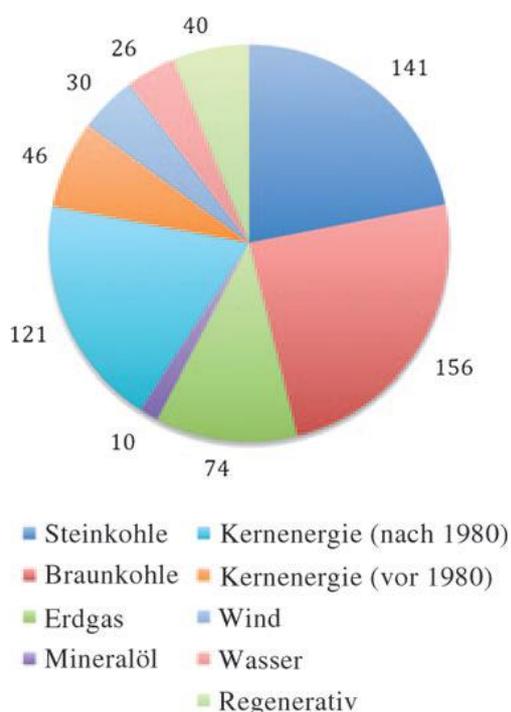


Figure 1. Stromerzeugung nach Energieträgern in Deutschland für das Jahr 2008. Die Werte sind auf TWh umgerechnet. Quelle: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energieDaten.html>.

Teil einer Lösung für den Ersatz der alten Kernkraftwerke könnte die Umstellung alter Kohlekraftwerke auf moderne Verbrennungsprozesse sein, um bei gleichem CO₂-Ausstoß deutlich mehr Strom zu produzieren. Im Zusammenhang mit der Struktur des neu zu errichtenden Stromnetzes mag es weiter sinnvoll sein, auch alternative Standorte zu erwägen. Vorsichtig sollte man allerdings mit einer Verknüpfung solcher Entscheidungen mit dem Zwang zu “Carbon Capture and Sequestration”(CCS)-Techniken sein, trotz deren augenscheinlicher Vorzüge. Es ist derzeit

nicht möglich, eine seriöse Folgenabschätzung der “Mineralisation” von CO₂ über lange Zeiträume vorzunehmen. Das Gebot der Nachhaltigkeit erfordert es daher, auf eine unkontrollierte Einlagerung zu verzichten und andere Wege zur CO₂-Minderung zu suchen. Außer der Nutzung von CO₂ für die Speicherung von durch Solarenergie erzeugtem Wasserstoff in Solarenergieträgern bietet sich kurzfristig die Mineralisation von Abfallbiomasse als Teil einer Lösung mit geringem Risiko an. Das Ausmaß der langfristig nötigen Hydrierung von CO₂ zu Energieträgern kann daraus abgeschätzt werden, dass heute etwa 30 % des Primärenergieimportes in Deutschland als Treibstoffe verwendet werden. Davon dürfte ein erheblicher Anteil nicht durch Elektromobilität ersetzbar sein.

Infolge des Atomausstiegs wird der Bau neuer Kraftwerke nötig werden. Diese Kraftwerke sollten unter Beachtung einer Diversität von Brennstoffen vermehrt als Gaskraftwerke konzipiert werden, wodurch eine wesentliche unmittelbare Verringerung der Treibhausgasemission erreicht werden wird. Zudem kann Methan auch aus Biomasse und durch Umsetzung von CO₂ mit Solarwasserstoff erzeugt werden, und wir besitzen ein gut ausgebautes Speicher- und Verteilsystem. Methan kann nicht nur bei uns, sondern auch in sonnenreichen Gegenden aus Solarwasserstoff erzeugt werden und eignet sich somit gut für den stofflichen Transport von Solarenergie etwa im unmittelbaren Austausch mit gesammeltem CO₂.

Die erneuerbaren Energien in Form von Windkraft und Photovoltaik werden selbst bei forciertem Ausbau nur begrenzt die Kernenergie ersetzen können, da Techniken zur Speicherung dieser Energie in chemischen Bindungen bisher nicht ausreichend entwickelt sind. “Intelligente” Verteilsysteme, Verbrauchsmanagement, Elektromobilität und thermo-mechanische Speicher helfen hier zwar weiter, inwieweit sie aber einen Ausgleich für die Verlässlichkeit konventioneller Anlagen und der Kernenergie bieten können, bleibt fraglich. Genaue Aussagen hierzu bedürfen einer systemischen Analyse, die von praktischen Erfahrungen mit dem komplexen Zusammenwirken aller Neuerungen im Energiesystem gestützt wird. Derzeit wäre viel gewonnen, wenn in einem interdisziplinären und demokratisch legitimierten Projekt ein fortzuschreibendes, belastbares Szenario zur Beantwortung dieser Frage erstellt werden könnte. In diesem Szenario käme der zeitlichen Entwicklung der gesellschaftlich tolerierten Gesamtemission von Treibhausgasen eine zentrale Bedeutung zu.

Die Rolle der Biomasse als regenerativer und speicherbarer Energieträger ist in unserer gegenwärtigen Energieversorgung bereits beachtlich, wie aus Abbildung 1 hervorgeht. Der Anteil der Biomasse könnte noch geringfügig gesteigert werden, wenn man sie nicht nur zur Stromerzeugung, sondern auch vermehrt lokal zur Wärmeerzeugung einsetzen würde. Hochwertige Nutzungen von Biomasse erfordern katalytische Depolymerisation und Defunktionalisierung, um zu Synthesebausteinen für die chemische Industrie zu gelangen. In keinem Fall sollten durch die Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung falsche Signale zum vermehrten heimischen oder

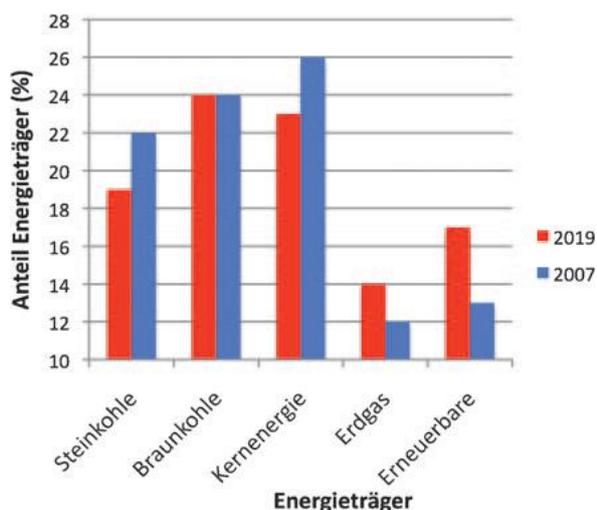


Figure 2. Aufteilung der Energieträger für die Stromerzeugung in Deutschland. Rot: eine Projektion für 2018 nach der Energiewende; blau: Daten von 2008. Quellen: BDEW 2011 und <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html>.

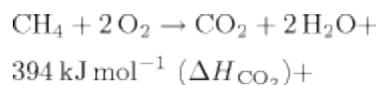
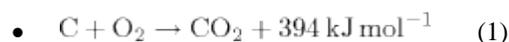
ausländischen Anbau von Pflanzen für diesen Zweck ausgeben, da wir die Landwirtschaft und ihre Ressourcen zuvorderst für die Produktion von Nahrungsmitteln benötigen.

In Abbildung 2 ist eine Projektion der Beiträge von Energieträgern zur Stromerzeugung für das Jahr 2018 durch die diskutierte Energiewende der Situation im Jahr 2008 gegenübergestellt. Der Ersatz erheblicher Anteile eines Energieträgers bedeutet eine große Anstrengung. Die Triebkräfte der gezeigten, moderaten Veränderungen sind der Ersatz der "alten" Kernkraftwerke und von alten Kohlekraftwerken. Man plant dafür den kombinierten Einsatz von regenerativen Energien und Erdgas. Weiter ist zu erkennen, dass die Verringerung der Treibhausgasemission durch den verstärkten Einsatz von regenerativen Quellen wieder aufgehoben wird, wenn die Kernkraft durch fossile Träger ersetzt wird. Ohne wesentliche technische Fortschritte sind keine weiteren erheblichen Veränderungen in dieser Verteilung möglich, wenn wir das Gebot der CO₂-Minderung beachten. Eine sehr hilfreiche Alternative ist dagegen die Verringerung des Primärenergieeinsatzes, die natürlich nicht durch Import von sekundären Energieträgern (Strom) erfolgen darf.

Der größte Verbrauch primärer Energie resultiert aus Verlusten bei der Energieumwandlung (1300 TWh im Jahr 2007), was man zum durch Kernkraft erzeugten Strom (160 TWh im Jahr 2007) in Relation setzen kann. Auch wenn viele dieser Verluste unvermeidlich sind, gibt es doch noch erheblichen Spielraum für Verbesserungen. Es ist offensichtlich, dass die Chemie hier an vielen Stellen etwas zum Besseren bewirken kann. Allerdings muss die Chemie zu diesem Zweck mit allen Wissenschaften, die am komplexen Netzwerk der Energiewandlung beteiligt sind, zusammenwirken. Wissenschaft alleine spart keine Energie, alle ihre Ergebnisse bedürfen der technischen Umsetzung, der ge-

sellschaftlichen Akzeptanz und der Wirtschaftlichkeit, womit sich weitere große Handlungsfelder für die Forschung und vor allem die Umsetzung auf tun.

Die Verwendung von Erdgas anstelle von nuklearen Energieträgern ist unter Emissionsgesichtspunkten und wegen der exzellenten Regelbarkeit entsprechender Kraftwerke eine bevorzugte Option. Der hohe Gehalt an Wasserstoff, die Verfügbarkeit aus vielfältigen fossilen Quellen, die regenerative Erzeugbarkeit und der Plattformcharakter für Speicherung und Transport machen Methan zum prototypischen günstigen Energieträger. Aus den Bruttogleichungen (1) und (2) der Verbrennung erkennen wir den Grund der Emissionsminderung bei der Verwendung von Erdgas als Energieträger. Obgleich die Verwendung zusätzlicher kohlenstoffhaltiger Energieträger für die Stromerzeugung problematisch ist, bleibt der Einsatz von Gas die beste Lösung für den geforderten raschen Atomausstieg, da die später verfügbare Erzeugung von Solarwasserstoff den nahtlosen Ersatz von fossilem durch "solares" Methan ermöglicht. Dies ist umso wichtiger, als im Rahmen des nationalen Energiekonzeptes die Emissionsminderungen aus anderen Treibhausgasquellen nur bedingt möglich sein werden, da dort bereits sehr anspruchsvolle Minderungsverpflichtungen vorliegen.



Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen entsteht durch Spaltung von Wasser mit der in überschaubarer Zukunft am meisten verfügbaren regenerativen Energieform: der primären Elektrizität aus Windkraft und Photovoltaik. Die stoffliche Speicherung dieser primären Energie ist ein Hauptziel der chemischen Energiewandlung. In geringen Mengen kann diese raum-zeitlich fluktuierende Energieform dem Verbrauch durch Speicherung in Batterien (stationär und durch e-Mobilität) und in thermo-mechanischen Speichern angepasst werden. Zur Deckung des Bedarfs an stofflichen Energieträgern und für die saisonale Speicherung wird man allerdings auf Wasserstoff aus Wasserspaltung zurückgreifen müssen. Dieser Wasserstoff kann entweder direkt industriell zurückgewandelt oder für Endanwendungen und zu Transportzwecken in andere molekulare "solare" Energieträger umgewandelt werden. Wir kennen zwar viele der notwendigen chemischen Prozesse, können sie aber bisher nicht auf den nötigen Größenskalen und mit der erforderlichen Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit betreiben. Zentrale chemische Herausforderungen sind die Notwendigkeit der Vermeidung seltener chemischer Elemente sowie der unvermeidbare Wechsellastbetrieb von Prozessen, die mit heutigen Systemen sehr schnell zu Schädigungen der verwendeten Materialien führen.

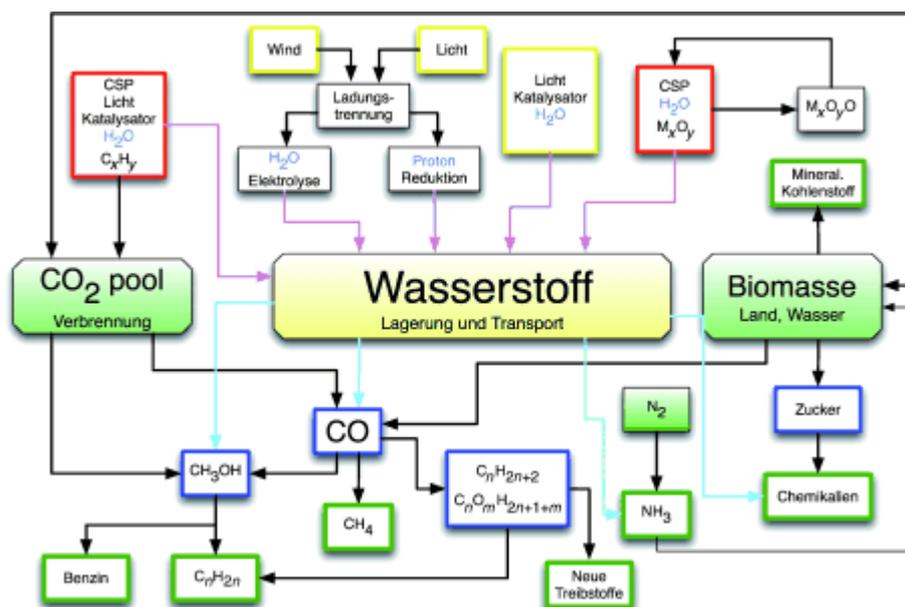


Figure 3. Das vereinfachte Fließbild einer ‘‘Sonnenraffinerie’’ zeigt ein Konzept für die Funktionsweise und Forschung an chemischer Energiespeicherung. Solarwasserstoff lässt sich (obere Hälfte, CPS: concentrated solar power) auf verschiedene Weise herstellen. Mit Kohlenstoff oder Stickstoff als molekularen Trägern lassen sich einige Plattformmoleküle (blau) erzeugen, die durch weitere Umwandlung in bekannte Energieträger (grün) überführt werden können. Mineralischer Kohlenstoff ist eine gefahrlose Lagerform zur CO₂-Bindung. Vielfältige innere Abhängigkeiten und das Gebot, die jeweils kürzeste Kette von Prozessen anzustreben, steuern die Umsetzung solcher Konzepte. Als Beispiel ist die Bedeutung von Ammoniak für die nachhaltige Bildung von Biomasse angegeben. Die Verfügbarkeit von großen Mengen an sauberem Wasser ist eine Voraussetzung, die für die Zukunft nicht selbstverständlich ist und weitere Anforderungen an die chemische Energiespeicherung stellen kann.

Das gesamte Potenzial chemischer Energiewandlungsprozesse zur Verwertung der Solarenergie ist in Abbildung 3 angedeutet. Man erkennt das Schema einer ‘‘Sonnenraffinerie’’, in der Wasserstoff erzeugt und über einige Plattformverbindungen in eine Reihe von stofflichen Energieträgern überführt wird. Man erkennt gut den systemischen Ansatz der chemischen Energiekonversion sowie die vielen Alternativen zu einer ‘‘Wasserstoffwirtschaft’’, die nicht angestrebt wird. Fast alle Endprodukte können mit heute existierenden Techniken gespeichert, verteilt und genutzt werden. Kreative chemische Forschung erschließt mithilfe von Designermolekülen verbesserte Endanwendungen, wie rußfreie Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren. Man erkennt aus Abbildung 3 allerdings auch, dass ein sehr weites Feld der Chemie überspannt wird, wenn man alle nötigen Prozesse der Sonnenraffinerie in den erforderlichen Maßstäben betreiben will. In erhöhtem Maße gilt dies für spätere Generationen solcher Raffinerien, in denen eine direkte Stoffumwandlung durch photochemische Prozesse die Bildung von freiem Wasserstoff ersetzt. Die ‘‘künstliche Photosynthese’’ ist trotz ihrer Eleganz und der enormen wissenschaftlichen Fortschritte in den vergangenen Jahrzehnten noch eine so große Herausforderung für die Chemie, dass sie in den kommenden zwei Jahrzehnten keine unmittelbare Nutzung erfahren dürfte.

Jenseits der Anwendung regenerativer Energien ist Chemie unverzichtbar, wenn es um Strategien zur Einspa-

rung von Energieträgern geht. Die zentrale Rolle maßgeschneiderter Materialien für zahllose Anwendungen und die sich daraus ergebende Bedeutung einer wissensbasierten Materialwissenschaft sind offensichtlich. Ebenso klar erkennbar ist, dass die Katalyse wesentlich für die Optimierung von Stoff- und Energieeinsatz in industriellen Prozessen ist. Auf diese Forschungsziele wird seit langem und mit großem Erfolg hingearbeitet, allerdings gibt es noch immer ein erhebliches Potenzial zur weiteren Einsparung von Energie. Die bisherige Geschichte dieser Forschungsrichtung zeigt uns, dass sich die Chemie als Wissenschaft in diesem Bereich noch erheblich weiter entwickeln muss und dabei die Grundlagenforschung nicht vernachlässigt werden darf. Die Wirksamkeit der Katalyse ist immer noch begrenzt, da wir nicht über ein theoretisch begründetes, allgemeines Konzept zur Vorhersage von Struktur-Funktions-Beziehungen verfügen. Der Katalysatorforschung fehlt noch ein Konzept, das die unterschiedlichen Teildisziplinen unter Berücksichtigung kinetischer Phänomene vereinheitlicht und so das Design katalytischer Materialien und Prozesse mit einem Minimum an experimentellem Input ermöglicht. Die kurzfristigen Aufgaben der Energiewende sollten uns nicht davon abhalten, die erkennbaren Problembereiche breit gefächert anzugehen. Es hat sich oft erwiesen, dass die wichtigsten Durchbrüche aus Grundlagenforschung hervorgehen, die nicht den allgemeinen Forschungsrichtungen folgt.