

Energiewende 2.0

Robert Schlögl

Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion
Stiftstr 34

Fritz Haber Institut
Faradayweg 4-6

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 in 2011 hat diesem Weg durch den Atomkraftausstieg einen Impuls gegeben, sie hat ihn jedoch weder verursacht noch verändert.

Die Energiewende 1.0 sieht vor, neben dem 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. Das soll durch CO₂-neutrale Bereitstellung von elektrischer Energie und einer Absenkung des Primärenregiebedarfes über das gesamte Energiesystem hinweg erreicht werden. Dieser Ansatz macht dann Sinn im Hinblick auf das Oberziel 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 hervorgebracht und zusammen mit einer öffentlich sehr verengten Wahrnehmung der "Kosten der erneuerbaren Energien" die anfänglich breite Zustimmung zur Energiewende erheblich eingetrübt. 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 dabei sind dem Ziel „Klimaschutz“ abträglich weil ihre Regelungsdichte die nötige Flexibilität für zumindest europäische Lösungen einschränkt, ohne welche 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 notwendig 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.

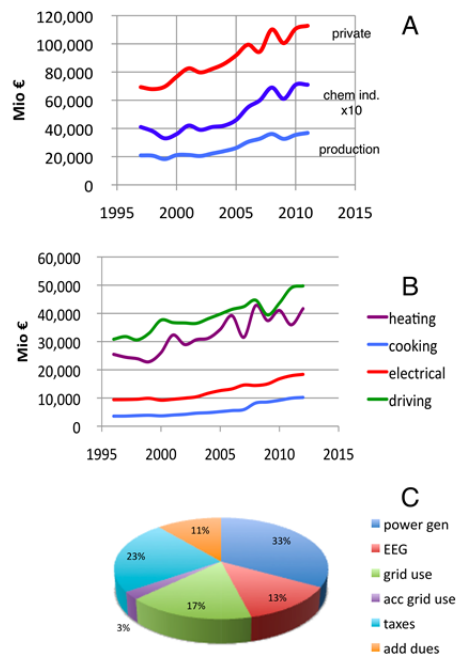


Abbildung 1: Kennzahlen zum deutschen Strommarkt als zeitliche Entwicklung seit 1990. (Quelle: BMWI Datenbank <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energiedaten.html>). (A) Ausgaben für Energie in Euro pro Jahr für die produzierende Industrie, die chemische Industrie (x10) und die Privathaushalte. (B) Aufteilung der Energiekosten nach Verwendungsarten für die privaten Verbraucher. (C) Kostenbestandteile für private Stromkunden in Berlin (Quelle: Vattenfall).

Abbildung 1 gibt zu dieser Debatte einige Orientierungsdaten. Der Energiemarkt (1A) für Privatkunden ist wesentlich größer als 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 wie beispielsweise 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 (1B) ein untergeordneter Betrag neben anderen Ausgaben für Energie. Die Kosten des Stromes und seiner Verteilung für Privatkunden (1C) 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 daher sich die Diskussion wieder übergeordneten Aspekten der Energiewende annehmen 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 für den Klimaschutz auswirken würde.

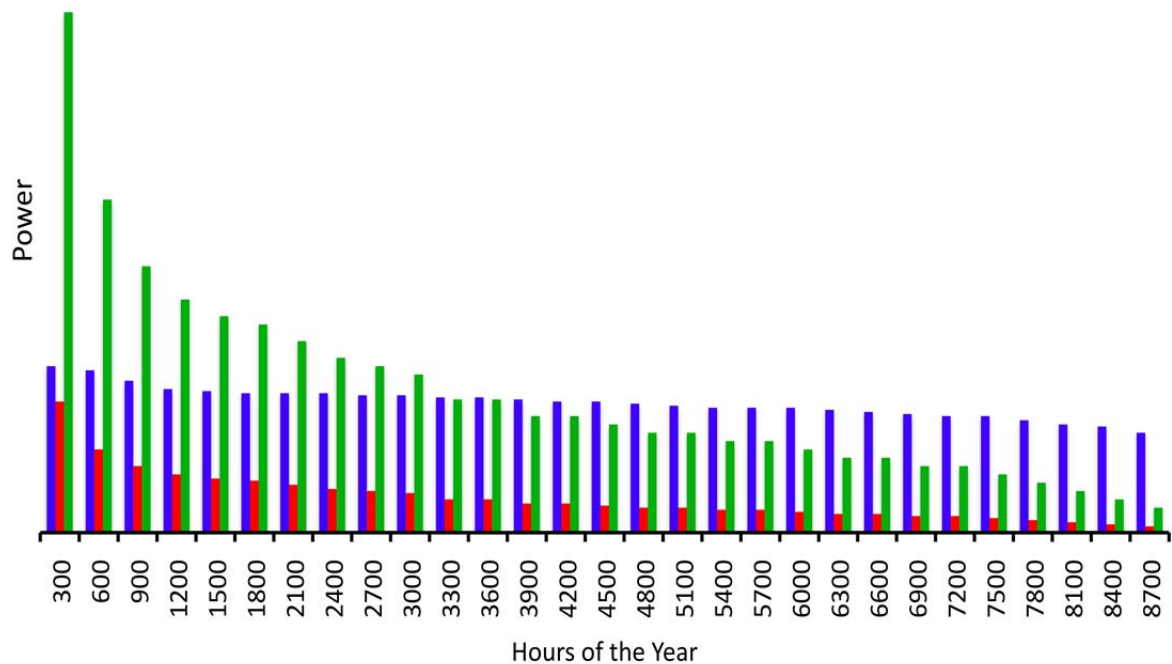


Abbildung 2: Schematisches Lastprofil Deutschlands (Maximallast ca. 80 GW). Blau: Lastbedarf, rot: Einspeisung EE etwa heute, grün: Einspeisung EE etwa 2035. Abszisse: Volllaststunden im Jahr. Das Profil der EE ergibt sich aus dem stabil angenommenen Mix von Wasser, Wind, PV und Bioenergie.

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 heute bereits erheblich sind, sie folgen allerdings in keiner Weise der Verbrauchskurve. Dies führt zur Notwendigkeit eines zunehmend flexibilisieren Einsatzes des fossilen Kraftwerksparkes, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Mit dem in der Energiewende 1.0 vorgesehenen erheblichen Zuwachs der EE wird in 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 Kraftwerksparkes notwendig und führt auf lange Zeit zur Koexistenz zweier Stromerzeugungssysteme bei gleichbleibendem (oder wie geplant vermindertem) Strombedarf.

Diese Doppelstruktur und weitere Belastungen aus dem notwendigen Netzausbau dürften auch bei mäßigen Kosten für die CO₂ Emission aus dem ETS System 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 das eine sinnvolle Lösung sein wenn der Überschußstrom aus erneuerbaren Quellen effektiv und wirtschaftlich zur Minderung von CO₂ Emissionen an anderen Stellen im System eingesetzt wird. Wie dies beispielhaft geschehen könnte, wird im Folgenden skizziert. Damit soll ein Beitrag zur geforderten Diskussion über systemische Fortentwicklungen 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 investiven Kosten 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 zu werden. Allerdings sind wir von derartigen Lösungen, welche die chemische Industrie besonders fordert, noch weit entfernt. Einen Teilbeitrag wird eine Nutzung der EE in der Elektromobilität 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.

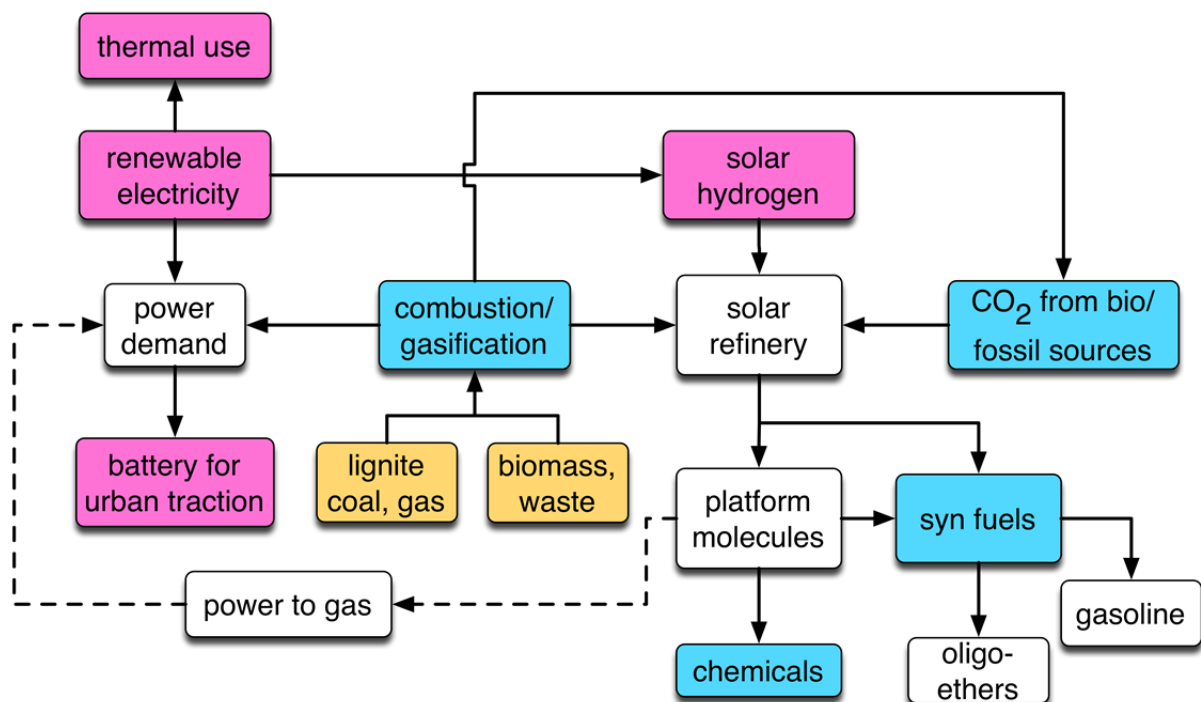


Abbildung 3: Schema einer Kopplung von regenerativer volatiler Elektrizität mit dem übrigen Energiesystem. Die Stromversorgung wird als Mischung erneuerbarer und fossiler Primärquellen angenommen, etwa wie sie in Abbildung 2 (grüner Fall) dargestellt ist. Es wird von der Verfügbarkeit erheblicher Mengen 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 solaren Wasserstoff und CO₂ Plattformmoleküle wie Methanol oder Methan hergestellt oder Synthesegas wird direkt in flüssige Treibstoffe umgewandelt. 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, falls sich das in besonderen Lastsituationen als günstig erweisen sollte. 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 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^[5]) als einfach herzustellendem und vollmischungsfähigen Ersatz mit etwa der halben Energiedichte als Diesel vorsehen, so würde man 2 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 vorhandene Märkte leicht aufnehmen können. 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 geführt werden.

Die Zahlen zeigen welche Dimensionen in der nachhaltigen Energiewandlung zu bewältigen sind. Vom Standpunkt der Grundlagenforschung aus betrachtet enthalten 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 entsteht. Nur derartiges Wissen kann zumindest auf längere 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. Neben 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 (siehe Abbildung 2) kritische Punkte, die eine Realisation derzeit riskant machen. Die Umsetzung des CO₂ mit Wasserstoff^[6] und die nachfolgende Veredlung enthalten keine wesentlichen unbekannt Schritte. Eine wirtschaftliche Elektrolyse im erforderlichen Umfang als intermittierende Last dürfte dagegen noch erhebliche Herausforderungen^[7] 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. Würden wir die nachfolgenden katalytischen Schritte ebenfalls im Takt der Elektrolyse intermittierend betreiben können was derzeit nicht geht, so würden sich die entsprechenden Anlagen vereinfachen, da Zwischenspeicher überflüssig werden. Eine Realisation des Schemas aus Abbildung 4 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 branchenübergreifende Anstrengung eine führende Rolle basierend auf ihrer einschlägigen Erfahrungen übernehmen. In der chemischen Forschung scheint es wichtig auch auf Grund der dargelegten Dimensionen sich nicht nur mit bio-mimetischen^[8] und durch Selbstorganisation unter milden Bedingungen stabilen Strukturen zu befassen sondern verstärkt auch an der Lösung der alten Herausforderungen^[9] der Gewinnung und Verwendung von Wasserstoff zu arbeiten. Die Natur kann mit ihrem Verzicht auf Edelmetalle^[10] ein wichtiges Vorbild für geeignete Ansätze der Materialwahl sein.

Die bisherigen punktuellen und auf einen einzelnen Parameter fixierten Anstrengungen 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 entsteht. Zu dessen Vorbereitung sind vielfältige Forschungsanstrengungen 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. Diese 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.

[1] aK. Riahi, A. Gruebler, N. Nakicenovic, *Technological Forecasting and Social Change* **2007**, 74, 887-935; bN. S. Lewis, *Science* **2007**, 315, 798-801.

- [2] F. Wagner, *European Physical Journal Plus* **2014**, 129.
- [3] A. Sharif, A. Almansoori, M. Fowler, A. Elkamel, K. Alrafea, *International Journal of Energy Research* **2014**, 38, 363-373.
- [4] R. Schlögl, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, 50, 6424–6426.
- [5] J. Burger, E. Strofer, H. Hasse, *Chemical Engineering Research & Design* **2013**, 91, 2648-2662.
- [6] G. Centi, E. A. Quadrelli, S. Perathoner, *Energy & Environmental Science* **2013**, 6, 1711-1731.
- [7] G. Gahleitner, *International Journal of Hydrogen Energy* **2013**, 38, 2039-2061.
- [8] N. Cox, D. A. Pantazis, F. Neese, W. Lubitz, *Accounts of Chemical Research* **2013**, 46, 1588-1596.
- [9] aI. C. Man, H.-Y. Su, F. Calle-Vallejo, H. A. Hansen, J. I. Martinez, N. G. Inoglu, J. Kitchin, T. F. Jaramillo, J. K. Norskov, J. Rossmeisl, *Chemcatchem* **2011**, 3, 1159-1165; bF. Schüth, R. Palkovits, R. Schlögl, D. S. Su, *Energy Environ. Sci.* **2012**, 5, 6278-6289.
- [10] K. Mette, A. Bergmann, J.-P. Tessonnier, M. Hävecker, L. Yao, T. Ressler, R. Schlögl, P. Strasser, M. Behrens, *ChemCatChem* **2012**, 4, 851-862.