

Chemische Energiespeicherung: Ein Element nachhaltiger Energiesysteme

Chemical energy storage: an element of sustainable energy systems

Schlögl, Robert

Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion, Mülheim an der Ruhr

Korrespondierender Autor

E-Mail: robert.schloegl@cec.mpg.de

Zusammenfassung

Die Energiewende führt zu immer größeren Anteilen an Strom aus erneuerbaren Energiequellen („grünem Strom“) im System. Trotzdem sinkt die Emission von CO₂ noch nicht wie erwartet. Die weitgehende Vernachlässigung des Mobilitätssektors gehört mit zu den Ursachen. Dieser Sektor erlebt einen der größten Umbrüche seiner Geschichte durch die Diskussion über Antriebsstränge. Dabei spielt die Chemie als ein möglicher entscheidender Problemlöser eine weitgehend passive Rolle, obgleich sie von den Ergebnissen dieser Diskussion massiv betroffen sein wird.

Summary

The energy conversion leads to even greater shares of renewable electricity ("green electricity") in the system. Nevertheless, the emission of CO₂ is not yet decreasing as expected. The major neglect of the mobility sector is one of the causes. This sector is experiencing one of the greatest upheavals in its history by discussing drive trains. As a possible critical problem solver, chemistry plays a largely passive role, although it will be severely affected by the results of this discussion.

Individuelle Mobilität durch Automobile stellt einen Grundpfeiler der globalen Wirtschaft dar. Derzeit existieren $1,21 \times 10^9$ Automobile ($6,1 \times 10^7$ beziehungsweise fünf Prozent davon in Deutschland) auf der Erde, der Zuwachs beträgt $8,3 \times 10^6$ Automobile pro Jahr oder 2,5 Autos pro Sekunde. Der Zuwachs an Autos ist derzeit identisch mit dem Zuwachs an Menschen auf der Erde. Der globale Motorisierungsgrad beträgt 160 Autos pro 1000 Menschen, ist aber regional sehr ungleichmäßig verteilt; in Deutschland beläuft sich der Wert auf 672 Autos pro 1000 Menschen, ähnliche Zahlen treffen auf die USA zu. Nahezu all diese Fahrzeuge benutzen Antriebsstränge mit Otto- oder Dieselmotoren als Kraftquelle. Um alle diese Fahrzeuge (Personen-, Lastentransporte) in Deutschland zu bewegen, war im Jahr 2014 ein Äquivalent von $2,43 \times 10^{12}$ Kilojoule als Otto- und Dieselmotorkraftstoff nötig, deren Verbrennung $1,61 \times 10^8$ Tonnen CO₂ erzeugte. Zu diesen Emissionen kommen die Wandlungsverluste durch chemische Energiekonversion: Für Erdöl zu Kraftstoff beträgt die Wandlungseffizienz (im Jahr 2015) 73 Prozent; zum Vergleich liegt die Effizienz für den deutschen Primärenergiemix zu Strom (im Jahr 2015) bei 36,8 Prozent.

Würde man die Antriebsleistung der mobilen Antriebsstränge entsprechend einer aktuellen Diskussion rein elektrisch erbringen, so wären dafür unter Zugrundelegung einer motorischen Effizienz von durchschnittlich 40 Prozent für den Verbrennungsmotor und von 90 Prozent für den Elektromotor allein in Deutschland etwa 295 Terawattstunden an elektrischem Strom erforderlich. Dafür würden beim heutigen Primärenergiemix für die Stromerzeugung zuzüglich zu den $3,26 \times 10^8$ Tonnen CO_2 für den allgemeinen Stromverbrauch weitere $1,51 \times 10^8$ Tonnen CO_2 für die Mobilität entstehen. Man erkennt, dass die e-Mobilität mittelfristig keinen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz erbringen kann. Nach dem Ausscheiden der Kernenergie aus dem Energiemix wird diese für erhebliche Zeit sogar eine Mehremission gegenüber einer auf Verbrennungsmotoren basierten Mobilität ergeben. Zudem wären erhebliche Infrastrukturinvestitionen in Stromerzeugung und -verteilung oder Wasserstoffherstellung und -verteilung erforderlich.

Die Diskussion um die Zukunft der Antriebsstränge wird breit und emotional seit „Dieselgate“ geführt. Zu einem allgemein vorhandenen Misstrauen gegenüber den Herstellerangaben über Treibstoffverbrauch und Emissionen kommt die Gewissheit über technische und juristische Manipulationen hinzu, sodass man zwar gesetzliche Vorgaben möglicherweise erfüllt, nicht aber die praktische Erwartung an die Verlässlichkeit der Angaben unter realitätsnahen Bedingungen eines Gebrauchs der Fahrzeuge auf der Straße.

In dieser Diskussion werden zwei Ziele miteinander vermischt. Zum einen möchte man den Beitrag des Verkehrs zum Klimaschutz vergrößern und konform dem Systemkonzept einer nachhaltigen Energieversorgung die erneuerbaren Energien auch in den Verkehrssektor einführen. Hier wird argumentiert, dass durch batterieelektrische Fahrzeuge oder durch die Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff in Brennstoffzellen der Anteil des Straßenverkehrs an der CO_2 -Emission eliminiert werden könnte. Zum anderen diskutiert man den lokalen Umweltschutz (in Ballungszentren) und sorgt sich um den Beitrag des Verkehrs zur Verschlechterung der Luftqualität. Hier geht es dann um regulierte Emissionen wie Feinstaub und NO_x als Teil von Reaktionsketten, die zu Sekundärteilchen und Kondensationskernen führen, welche sich als Smog derzeit sehr drastisch in Megastädten etwa in China bemerkbar machen.

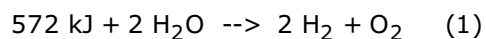
Das Resultat dieser Diskussionen ist eine grundsätzliche Infragestellung der Nutzung von Verbrennungsmotoren in der Zukunft, unabhängig von der Technologie, den Entwicklungspotenzialen und dem Ziel der Umstellung der Antriebstechnologie. Unterstellt man lokale Gegebenheiten wie weitgehende Stromversorgung mit grünem Strom, ein geeignetes Netz an Ladestationen oder Wasserstofftankstellen und eine erhebliche Weiterentwicklung der Technologien von Batterien und Brennstoffzellen [1], so sind solche Szenarien für Personenkraftwagen möglich und für den Schutz unseres Lebensraumes auch erstrebenswert [2]. Allerdings wird es die notwendige Kombination aller genannten Voraussetzungen nicht schnell und auf etwa 30 Jahre gesehen wohl nur in wenigen Regionen der Welt geben können. Zudem dürften Schwermaschinen, Lasttransporte über weite Strecken und Flugzeuge nicht auf diese Technologien umrüstbar sein und daher einen Sockelbetrag von Emissionen durch Verkehr bilden. Ein weiterer Beitrag zu dieser Grundemission entsteht durch Abnutzung von Reifen und Straßenbelägen als Primärquellen für Teilchenemissionen. Er ist heute nur schwer analytisch und in seiner Wirkung beurteilbar.

Die Chemie hat zu dieser Vision, auch wenn sie nur teilweise umgesetzt werden soll, noch erhebliche Beiträge zu leisten [3]. Neben der systemischen Weiterentwicklung von Akkumulatoren, welche die Anforderungen an eine massenweise Einführung, an Sicherheit und einen nachhaltigen Lebenszyklus erfüllen können [4], ist insbesondere auch die Wasserstofftechnologie erheblich weiter zu entwickeln [5]. Hier geht es zuerst um die Bereitstellung aus erneuerbarer Energie durch Elektrolyse, fotochemische oder biobasierte Verfahren. Der verbreitete Ansatz, Kohlenwasserstoffe zu Wasserstoff zentral oder dezentral zu reformieren, kann keine

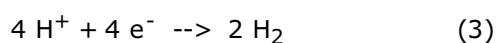
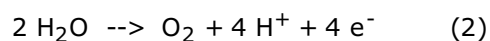
Lösung im eigentlichen Sinne sein [6]. Transport, Lagerung und Verteilung stellen weitere erhebliche Herausforderungen dar, die bisher noch nicht praxistauglich und weltweit einsetzbar gelöst sind. Und schließlich sind auch für den Lebenszyklus einer Brennstoffzelle noch viele Herausforderungen im Praxiseinsatz zu erfüllen [7]. Die Verwendung von Edelmetallkatalysatoren stellt dabei noch nicht das größte Problem dar, da hier enorme Fortschritte zu verzeichnen sind.

Zentral für die Vision, die Mobilität emissionsarm zu organisieren, ist es, einen großtechnischen Weg für die Umwandlung von grünem Strom in Wasserstoff zu finden. Dieser wird allerdings nicht nur in der Mobilität sondern auch in anderen Bereichen des Energiesystems benötigt, so dass mit einer sehr großen Dimension der Umsetzung zu rechnen ist. In der vorhersehbaren Zukunft kann dies nur durch Elektrolyse erfolgen. Dabei steht die Reaktion mit flüssigem Wasser in basischer oder eventuell auch in saurer Lösung ganz im Vordergrund. Andere Verfahren, die Wasserspaltung durch Plasmaenergie, die direkte fotochemische Wasserspaltung und auch biologische Verfahren sind derzeit nicht in einem Zustand, dass man in den kommenden zwei Jahrzehnten mit einer großtechnischen Umsetzung rechnen kann.

Die Wasserspaltung ist – chemisch gesehen – eine Reaktion zur Energiespeicherung:



Diese Reaktion ist eine Redox-Reaktion die aus zwei Halbreaktionen besteht. In saurer Elektrolytlösung sind diese Reaktionen



Mechanistisch sind beide Reaktionen problematisch, weil pro Formeleinheit-Produkt zwei beziehungsweise vier Elektronen übertragen werden müssen. Die eigentlich gewollte Reaktion (3) verläuft sehr gut an Edelmetallelektrokatalysatoren. Auch kostengünstigere Materialien sind heute weit entwickelt, werden aber technisch nicht eingesetzt. Die Reaktion (2) will man eigentlich nicht, sie ist aber zwingend erforderlich, um die Elektronen für die Entladung der Protonen zu Wasserstoff zu liefern. Sie ist das eigentliche Problem der Gesamtreaktion. In saurer Lösung funktioniert nur Iridiumoxid als stabiler Elektrokatalysator. In der meist technisch ausgeübten Elektrolyse im Alkalischen kommt man mit Nickeloxid zurecht. Die Analyse der Funktion des Iridiumoxides gelang am Fritz-Haber-Institut. Eine Beschreibung der wesentlichen Ergebnisse findet man in dessen aktuellen Jahresbericht.

Auch in der Photosynthese der Natur taucht Reaktion (2) auf. Dort wird sie durch das "Photosystem II" einem extrem komplexen Enzymsystem bewerkstelligt. Wir wissen heute gut über diese Reaktion Bescheid und verstehen auch, warum eine direkte Kopie des natürlichen Prozesses an der Komplexität des Katalysators scheitert [8]. Wir lernen sehr viel aus diesen Einsichten und entschließen uns, einen grundsätzlich einfacheren Weg zu suchen. Die Kontrolle der raum-zeitlichen Abfolge der verschiedenen Elementarprozesse erfolgt bei einem künstlichen Katalysator zur Wasserspaltung durch die strukturelle Dynamik an einer Elektrodenoberfläche und nicht, wie in der Natur, durch ein feines Zusammenspiel vieler schwacher supramolekularer und molekularer Wechselwirkungen in der Struktur des Enzyms.

Bemerkenswert ist, dass in der Natur als aktives Zentrum nicht Nickeloxid, sondern Manganoxid als Ca-Mn-Oxo-Komplex Verwendung findet. Es liegt daher nahe, Oxide des Mangans als technische Katalysatoren einzusetzen. Unser Institut koordiniert ein nationales Projekt (MANGAN), das versucht, auf der Basis einer von uns entwickelten einheitlichen Bewertung der katalytischen Leistung herauszufinden, ob es Verbindungen des

Mangans gibt, die sich praktisch einsetzen lassen. Die besondere Herausforderung ist dabei, eine Stabilität der Verbindungen über wenigstens einige Tage zu erreichen. Das genügt für hinreichend präzise Messungen, aber noch lange nicht zur technischen Umsetzung (notwendige Stabilität etwa 100 000 Stunden).

Wären wir nun, auf welchem Wege auch immer, in der Lage, ausreichend grünen Wasserstoff zu erzeugen, der keine CO₂-Emission mit sich bringt, so könnten wir diesen dazu nutzen, CO₂ aus unvermeidlichen Quellen in Kohlenwasserstoffe zu verwandeln und diese dort einzusetzen, wo heute fossile Kohlenwasserstoffe (Öl, Gas) verwendet werden. Die bei weitem größte Anwendung dieser Art ist die weltweite Mobilität. Jeden Tag werden fünf Millionen Tonnen Öl für die Mobilität weltweit verbraucht und produzieren etwa 25 Prozent der weltweiten Emissionen an CO₂.

In solch einem Modell dürfte man Fahrzeuge nicht dekarbonisieren, wie derzeit gefordert wird, sondern müsste sie defossilisieren. Sinnvollerweise würde man neuartige Molekülstrukturen für synthetische Kraftstoffe wählen, die in herkömmlichen Motoren verbrannt werden können und die keine Umweltemissionen wie Rußteilchen und Stickoxide produzieren. Solch ein „Traumkraftstoff“ wurde für Dieselmotoren bereits identifiziert und wird getestet. Für Ottomotoren sind andere Molekülstrukturen erforderlich.

Der größte Nachteil dieser sogenannten Oxymethylenäther (OME) ist ihr Energiegehalt, der nur halb so groß (21,4 Megajoule pro Kilogramm) ist wie für Diesel (45,5 Megajoule pro Kilogramm). Das wäre kein Problem für Automobile und LKW, aber für Flugzeuge würde solch eine Lösung nicht ausreichen. Dafür könnte man unter Verwendung von Biomasse sehr energiereiche Molekülstrukturen gewinnen, die dann nicht so rein verbrennen.

In Abbildung 1 sind ein Syntheschema und die Molekülstruktur von OME gezeigt. Man erkennt, dass die Moleküle reich an Sauerstoff sind, was zu guter Verbrennung aber auch zu reduziertem Energiegehalt führt. Da in OME keine C-C-Bindungen vorhanden sind, kann während des Verbrennungsprozesses keine Kondensation zu Aromaten und daher zu Ruß entstehen.

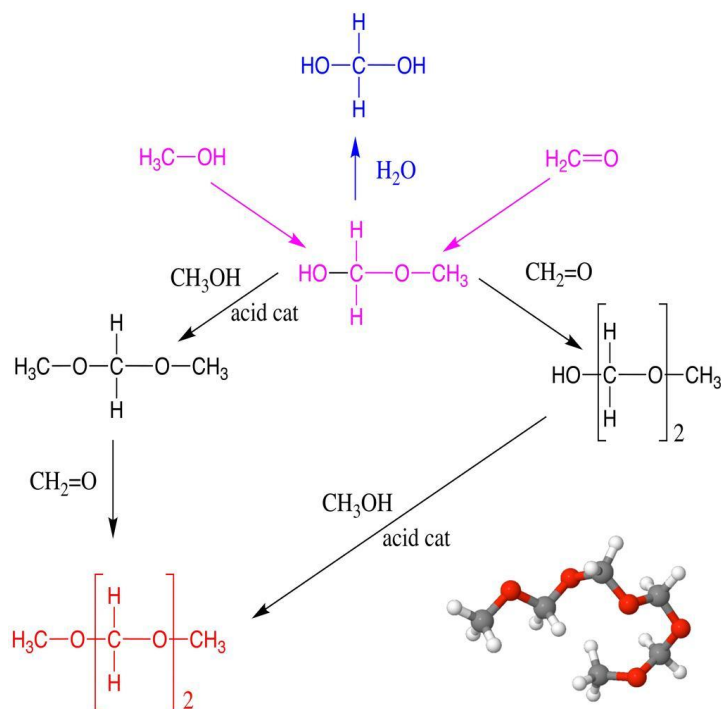
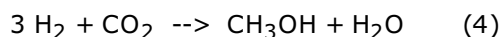


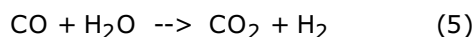
Abb. 1: Syntheseschema für OME-Kraftstoffe. Benötigt werden Methanol, Formaldehyd und ein Katalysator (acid cat). Das Molekülbild zeigt die OME-4-Struktur (rot Sauerstoff, grau Kohlenstoff, weiß Wasserstoff).

© MPI für Chemische Energiekonversion

Der Ausgangsstoff für die Synthese ist Methanol, das aus CO₂ und Wasserstoff nach der Gleichung



entsteht. Wir produzieren auf der Welt derzeit etwa 6×10^6 Tonnen pro Jahr Methanol für viele chemische Zwecke. Daher ist die Kenntnis über die Reaktion sehr gut entwickelt. Allerdings benutzen wir nicht CO₂, sondern CO im Gemisch mit CO₂ als Rohstoff. Dies ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass das nach Gleichung (4) entstehende Wasser die Reaktion behindert und den Katalysator, der aus einer komplizierten Mischung von Kupfer und ZnO mit zusätzlichen Hilfsstoffen besteht, schädigt. Dagegen hilft das CO, das nach



reagiert und zusätzlich die Reaktionswärme aus Gleichung (4) verwendet und damit den Reaktor von innen heraus kühlen hilft.

Am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion (MPI CEC) untersuchen wir, ob sich mit dem technischen Katalysator Methanol auch aus reinem CO₂ herstellen lässt und ob der Katalysator dabei stabil ist. Zudem wird man von einem Reaktor, der mit grünem Wasserstoff arbeitet, erwarten müssen, dass er nicht zeitlich konstant arbeitet, sondern in seiner Produktivität der Verfügbarkeit von Wasserstoff folgen kann. Somit wird man zunächst den Betriebsdruck variieren. Dieser sollte so niedrig wie möglich sein, um den Wasserstoff schon bei seiner Entstehung komprimieren zu können und eine Druckerhöhungsstufe einzusparen.

Es zeigte sich, dass sich all diese Randbedingungen erfüllen lassen und man unter bestimmten

Betriebsbedingungen stabil mit heutigen Katalysatoren gute Ausbeuten von Methanol erzielen kann. Auch gelingt es, den Betriebsdruck zu variieren, ohne den Katalysator dadurch besonders zu schädigen (siehe Abb. 2).

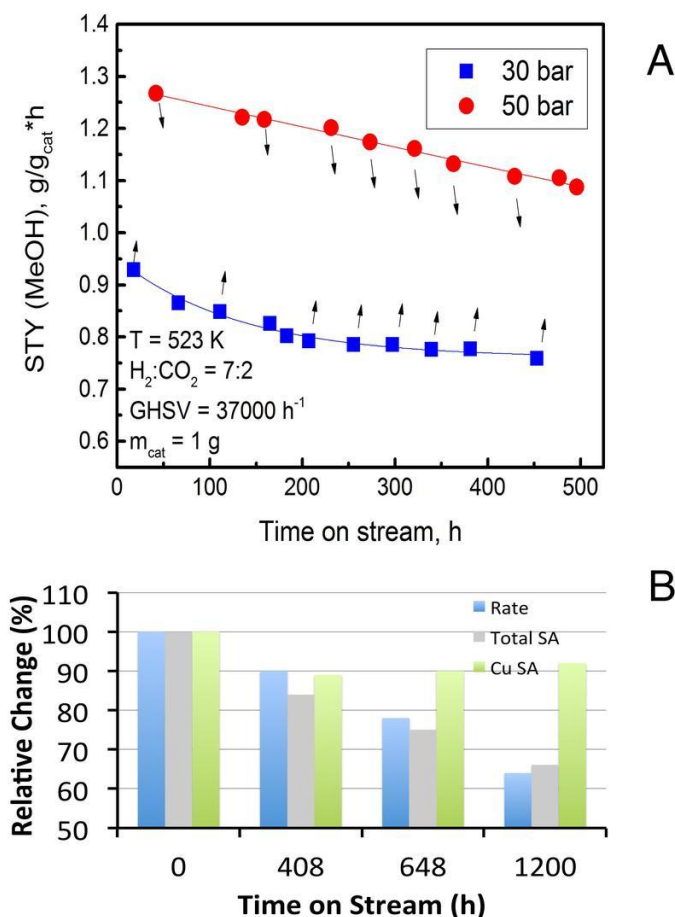


Abb. 2: Synthese von Methanol aus reinem CO_2 und Wasserstoff. (A) Raum-Zeit-Ausbeuten bei zwei Drücken. Die Pfeile geben die Richtungen der Druckwechsel an. (B) Veränderung von Reaktionsrate, gesamtter Oberfläche (total SA) und Kuperoberfläche (Cu SA) über die Zeit mit einem CO_2/CO Synthesegas bei 60 bar Druck.

© MPI für Chemische Energiekonversion

Die gezeigten Raum-Zeit-Ausbeuten entsprechen weitgehend denen der technischen Synthese. Allerdings müssen unter den hier vorgestellten Bedingungen die Reaktionsgase umfangreich im Kreis gefahren werden, da bei jedem Durchgang der Gasmischung durch den Reaktor nur etwa fünf Prozent des CO_2 umgesetzt werden. Dieser Nachteil lässt sich beseitigen, wenn man einen wesentlich aktiveren Katalysator findet, der ebenso stabil ist wie der hier verwendete. Dabei sind Edelmetalle als grundsätzlich sehr aktive Stoffe leider ausgeschlossen, da bei einer weltweiten Verwendung dieser Verfahren nicht genügend Metall zur Verfügung stünde.

Deshalb versuchen wir anhand des Katalysatorverhaltens zu ergründen, wie weit sich Kupfer noch in seiner Aktivität steigern lässt. Erste Schlüsse dazu lassen sich aus dem Verständnis der zeitlichen Deaktivierung des Systems ziehen (siehe Abb. 2). Dazu wurde eine sehr aufwendige Studie über 148 Tage Beobachtungszeit durchgeführt [9]. In dieser Zeit wurde ein Katalysator mehrfach aus einem besonderen Reaktor ausgebaut,

strukturell untersucht und wieder in den Reaktor zurück verbracht. Aufschlussreich sind die Daten aus Abbildung 2(A) weil sie bei zwei Drücken zwei unterschiedliche Verläufe der Deaktivierung zeigen. Dies bedeutet, dass es zwei unterschiedliche Ursachen dafür gibt, die zusammenwirken. Vergleicht man die Trends der Abbildung 3(A) mit denen in Abbildung 2(B), ist bei geringem Druck vor allem ein Verlust von Kupferoberfläche zu erkennen. Dieser entsteht vermutlich, weil sich die Nanostrukturen des Metalls vergrößern. Bei hohem Druck verringert sich dagegen vor allem die Gesamtoberfläche. Dies führen wir darauf zurück, dass sich das ZnO, das unter anderem als mineralischer Trennstoff für die Kupferstrukturen dient, verändert. Dies dürfte vor allem dem vermehrten Anfall von Wasser bei höherer Produktivität zuzurechnen sein. Das zeigt, dass die „Trocknungsreaktion“ nach Gleichung (5) nicht optimal funktioniert.

Diese Annahmen lassen sich direkt durch elektronenmikroskopische Abbildung überprüfen. Führt man die Desaktivierung in einem Mikroreaktor durch, so kann man ein einzelnes Katalysatorteilchen vor und nach der Desaktivierung beobachten (siehe Abb. 3).

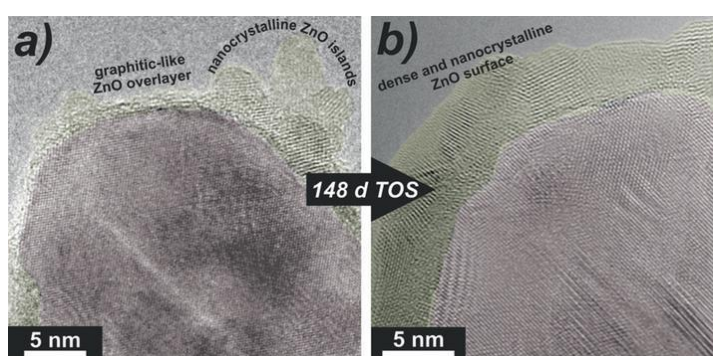


Abb. 3: Elektronenmikroskopische Aufnahmen eines Teilchens des Kupfer-Zinkoxid Katalysators vor und nach 148 Tagen Betriebsdauer bei 30 bar Druck in CO/CO₂-Wasserstoffgas.

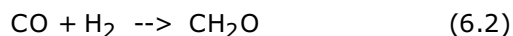
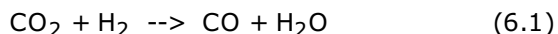
© MPI für Chemische Energiekonversion

Der Kern des Teilchens aus Kupfer hat sich verändert, ebenso wurde die Hülle aus ZnO erheblich umstrukturiert. Die Feinstruktur der Objekte zeigt, dass beide Komponenten an innerer Ordnung gewonnen haben. Folglich ist eine jeweils stabil bleibende defekte Struktur der Komponenten wesentlich für eine hohe Aktivität. Das Ausheilen der Defekte stellt die wesentliche Ursache für den Verlust von Aktivität dar. Damit haben wir nun Anhaltspunkte, um eine wirksame Verbesserung des Katalysators durch eine geänderte Strategie bei der Auswahl der Parameter für die Synthese zu erreichen [10]. Wir müssen dazu nicht die Aktivkomponenten verändern. Allerdings zeigt eine vertiefte Behandlung, dass die Stabilisierung der defekten Struktur nur möglich ist, wenn wir in die elektronische Struktur des ZnO etwa mithilfe von Dotierelementen eingreifen.

Um nun unseren Designerkraftstoff OME herstellen zu können, benötigen wir Formaldehyd, möglichst in wasserfreier Form. Nur dann lässt sich die Bildung von Methandiol, ein Molekül das wir nicht weiterverwenden können, vermeiden (siehe Abb. 1, blaue Reaktion). Dies ist eine erhebliche Herausforderung für die Katalyseforschung. Wir verfügen über Verfahren, mit denen sich große Mengen Formaldehyd herstellen lassen. Dies geschieht durch Oxidation von Methanol und sofortiger Abschreckung des wenig stabilen Produktes in Wasser zur Bildung von Formalin-Lösung. Daraus reinen Formaldehyd zu isolieren, ist durch Umsetzung zu Trioxan zwar möglich, aber sehr energieaufwendig. Verzichteten wir auf diese Reinigung, so wird die OME-Synthese ebenso sehr energieaufwendig, da nun dort destilliert werden muss, was sehr viel Energie verschlingt.

Zusätzlich ist es nicht atomökonomisch, zuerst mit viel Aufwand durch Spaltung von Wasser den Wasserstoff

für die Synthese von Methanol zu gewinnen und ihn anschließend wieder teilweise zu Wasser zu oxidieren. Die „Traumreaktion“ wäre also der Prozess



Der erste Schritt, die umgekehrte Wassergasreaktion, gelingt gut mit verschiedenen Katalysatoren. Der Folgeschritt ist hingegen sehr schwer zu bewerkstelligen, da das Produkt nicht sehr stabil ist und die Synthesereaktion sich leicht umkehren lässt. Das MPI für chemische Energiekonversion wird sich in Zukunft mit dieser Herausforderung befassen und Wege suchen, diese Reaktion möglichst elegant umzusetzen.

Das Produkt OME ist vollständig frei von Formaldehyd und stellt keine Gefahr für Umwelt und Gesundheit dar. Es ist wasserlöslich und biologisch abbaubar, was die Gefahr von Umweltverschmutzungen durch Leckagen sehr vermindert. Es ist farblos und geruchlos und kann nicht explodieren. Außerdem lässt es sich in herkömmlichen Tankstellen vertreiben. Auch lässt es sich im Gemisch mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff verwenden, wobei dann allerdings die Vorteile der schadstoffarmen Verbrennung im Verhältnis der Mischung verloren gehen.

Mit dieser neuartigen chemischen Lösung ließe sich nun ein Kreislauf des CO_2 im Energiesystem erreichen. Abbildung 4 zeigt, dass durch ein Zusammenwirken der OME-Synthese aus CO_2 und der Sammlung des durch die Mobilität freigesetzten CO_2 mittels Biomasse (Holz) ein Kohlenstoffkreislauf entsteht, der chemisch gebundene erneuerbare Energie über die Bildung von grünem Wasserstoff in die Mobilität einbringt. Dafür benötigen wir zwar einige chemisch-katalytische Prozesse, die aber wesentlich einfacher zu handhaben sind als die Kombination aus biologischer Photosynthese mit nachfolgender Aufbereitung der Biomasse zu einem umweltfreundlich verbrennbaren Kraftstoff.

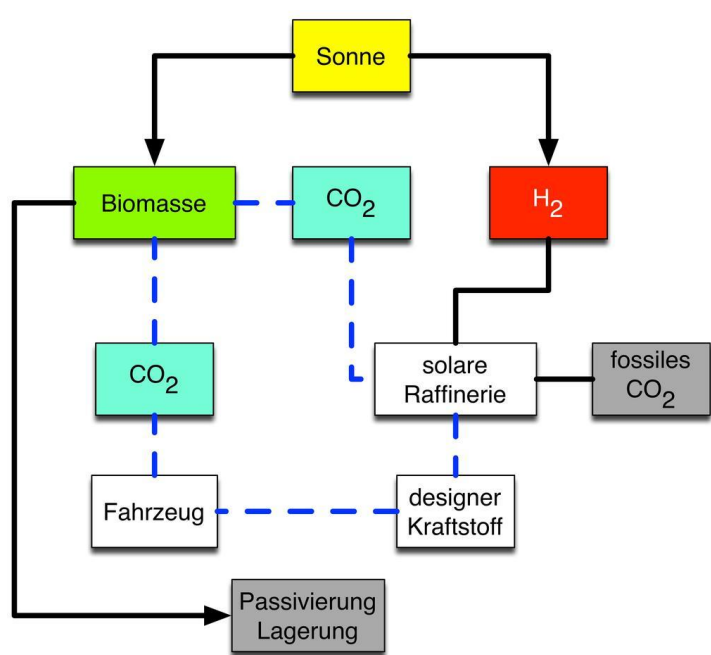


Abb. 4: Ein Kreislauf für CO_2 in der Mobilität (blau). Damit vermeidet man neue Infrastrukturen und Fahrzeuge und ist dennoch klimaneutral.

© MPI für Chemische Energiekonversion

Das Gesamtverfahren vermeidet die Nachteile der Nutzung von reinem Wasserstoff in der Mobilität. Es umgeht

auch die noch sehr herausfordernde Entwicklung von Batterien, die wesentlich leistungsfähiger als alle heute bekannten Modelle sind. Solche Batterien sind zudem nicht ungefährlich, wenn man chemisch die Energiespeicherdichten betrachtet. Nachteilig ist die Kompliziertheit des Prozesses, der sich allerdings sehr an der natürlichen Fotosynthese orientiert. Wir erzeugen dabei Moleküle, die denen der Natur nicht unähnlich sind (etwa Zucker), sich aber wesentlich besser als dieser für Mobilitätsanwendungen eignet.

Die Abbildung deutet auch an, wie man fossiles CO₂, das es noch lange aus Punktquellen (etwa in der Schwerindustrie) geben wird, in die Mobilität überführen kann. Entzieht man im gleichen Maße, wie man fossiles CO₂ einsetzt, dem globalen Kreislauf Kohlenstoff durch chemische Passivierung und Ablagerung von Biomasse, so kann dieses System sogar zu einer „sub-zero“-Emission, also zu einer Senke für atmosphärisches CO₂, im Gesamtsystem der Energieversorgung werden.

Das MPI für chemische Energiekonversion (CEC) arbeitet in Zukunft an allen Aspekten eines derartigen Kohlenstoffkreislaufes. Sie alle haben eine gemeinsame wissenschaftliche Wurzel. Diese ist die Katalyse an Grenzflächen und eventuell auch in homogener Phase. In der langen Geschichte dieser Wissenschaft hat man es seit der Erlangung grundsätzlicher Einsichten in ihre Funktion weitgehend vermieden, sich mit den Umwandlungen einfacher Energieträger zu befassen. Tun wir dies, so erkennen wir klar, wie wenig wir noch wirklich das Wesen der Katalyse verstehen. Dies liegt an den vergleichsweise einfachen Reaktionen, an der enormen Größe ihrer Umsetzung, wenn sie systemrelevant werden sollen, und an den enormen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Hindernissen, die eine Energieversorgung ohne fossile Träger mit sich bringt. Es ist die Aufgabe dieses Institutes, sich durch all dies nicht vom Ziel der Bereitstellung wissenschaftlicher Erkenntnisse und synthetischer Produkte für die Energiewende abbringen zu lassen.

Literaturhinweise

[1] **Etacheri, V.; Marom, R.; Elazari, R.; Salitra, G.; Aurbach, D.**

Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review

Energy & Environmental Science, 4, 3243-3262 (2011)

[2] **Tan, K. M.; Ramachandaramurthy, V. K.; Yong, J. Y.**

Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques

Renewable & Sustainable Energy Reviews, 53, 720-732 (2016)

[3] **Ausfelder, F.; Beilmann, C.; Bertau, M.; Bräuninger, S.; Heinzl, A.; Hoer, R.; Koch, W.; Mahlendorf, F.; Metzelthin, A.; Peuckert, M.; Plass, L.; Räuchle, K.; Reuter, M.; Schaub, G.; Schiebahn, S.; Schwab, E.; Schüth, F.; Stolten, D.; Teßmer, G.; Wagemann, K.; Ziegahn, K.-F.**

Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung Energy Storage Technologies as Options to a Secure Energy Supply

Chemie Ingenieur Technik, 87, 17-89 (2015)

[4] **Girishkumar, G.; McCloskey, B.; Luntz, A. C.; Swanson, S.; Wilcke, W.**

Lithium - Air Battery: Promise and Challenges

Journal of Physical Chemistry Letters, 1, 2193-2203 (2010)

[5] **Nikolaidis, P.; Poullikkas, A.**

A comparative overview of hydrogen production processes

Renewable & Sustainable Energy Reviews, 67, 597-611 (2017)

[6] **Hosseini, S. E.; Wahid, M. A.**

Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development

Renewable & Sustainable Energy Reviews, 57, 850-866 (2016)

[7] **Steele, B. C. H.; Heinzl, A.**

Materials for fuel-cell technologies

Nature, 414, 345-352 (2001)

[8] **Perez-Navarro, M.; Neese, F.; Lubitz, W.; Pantazis, D. A.; Cox, N.**

Recent developments in biological water oxidation

Current Opinion in Chemical Biology, 31, 113-119 (2016)

[9] **Lunkenbein, T.; Girgsdies, F.; Kandemir, T.; Thomas, N.; Behrens, M.; Schlögl, R.; Frei, E.**

Bridging the Time Gap: A Copper/Zinc Oxide/Aluminum Oxide Catalyst for Methanol Synthesis Studied under Industrially Relevant Conditions and Time Scales

Angewandte Chemie Internationale Edition, 55, 12708-12712 (2016)

[10] **Schumann, J.; Tarasov, A.; Thomas, N.; Schlögl, R.; Behrens, M.**

Cu,Zn-based catalysts for methanol synthesis: On the effect of calcination conditions and the part of residual carbonates

Applied Catalysis A, 516, 117-126 (2016)