

Jenseits von Öl und Gas: die Methanolwirtschaft**

George A. Olah*

Stichwörter:

Kohlenwasserstoffe · Methanol · Umweltchemie · Wasserstoff

Öl

Erdgas und Kohle, unsere wichtigsten fossilen Brennstoffe, sind nicht nur immer noch unsere bedeutendsten Energiequellen, sondern auch Grundstoff für die Erzeugung einer Vielzahl an Materialien und Produkten (wie Benzin und Dieselkraftstoff, petrochemische und chemische Produkte einschließlich synthetischer Materialien, Kunststoffe und Pharmazeutika). Diese Geschenke der Natur, die über Jahrtausende gebildet worden sind, werden nun ziemlich schnell verbraucht. Die Erschöpfung der Vorräte an fossilen Brennstoffen schreitet deutlich voran, was eine stetige Verteuerung zur Folge haben wird. Aus diesem Grund sind wir gezwungen, nach neuen Quellen und Lösungen zu suchen.

Alle fossilen Brennstoffe sind Kohlenwasserstoffgemische mit unterschiedlich großen Anteilen an Kohlenstoff und Wasserstoff. Nach dem Verbrennen sind sie unwiederbringlich verbraucht: Kohlenstoff wird in Kohlendioxid und Wasserstoff in Wasser umgewandelt. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Zunahme des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre als wichtiger vom Menschen zu verantwortender Grund für die globale Erwärmung angesehen wird.

Kohle und die industrielle Revolution

Die Kohle entstand vor etwa 300 Millionen Jahren im Karbon durch die anaerobe Verwitterung damals vorkommender Pflanzen. Anfangs wurde sie nur selten als Heizmaterial verwendet; dies änderte sich allmählich im 16. und 17. Jahrhundert, als sie, hauptsächlich in England, als Ersatz für das zunehmend knapper werdende Holz immer häufiger zum Heizen diente. Durch die Erfindung der Dampfmaschine und die darauf folgende industrielle Revolution wurde die Kohle im 18. Jahrhundert zum wichtigsten Brennstoff. Im 19. und 20. Jahrhundert wurde sie weiterhin zur Deckung des ständig steigenden Energiebedarfs der Menschheit verwendet; heute wird sie hauptsächlich zur Erzeugung von Elektrizität eingesetzt.^[1] Es gibt sicherlich noch ausreichend Kohlevorkommen für die nächsten zwei oder drei Jahrhunderte, der Kohleabbau ist aber in zunehmendem Maße (mit Ausnahme der für den Tagebau geeigneten Gebiete) durch sozio-ökonomische, Sicherheitsrelevante und ökologische Schwierigkeiten beeinträchtigt.

Erdöl und Erdgas

Mit Beginn der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden Erdöl und Erdgas zu den wichtigsten und bedeutendsten Energiequellen und Grundstoffen für Chemikalien und künstliche Materialien. Sie sind zweifelsohne die praktischsten fossilen Brennstoffquellen.

Über den Umfang unserer verfügbaren Öl- und Gasquellen wurde im Laufe der Jahre viel gesagt. Auf den ersten Blick scheinen die geschätzten

weltweiten Öl- und Gasreserven beeindruckend. Diese Reserven scheinen sich in den letzten 50 Jahren nicht verringert zu haben,^[2] weil stetige Entwicklungen und verbesserte Technologien die Erkundung, Produktion und Förderung in immer schwerer zugänglichen Regionen ermöglicht haben, beispielsweise in der Tiefsee und in unwirtlichen Landschaften wie Wüstengebiete oder die Arktis. Die Technologien zur Sekundär- und Tertiärförderung aus früher ausgebeuteten Feldern sowie die Energieeinsparung spielen eine wichtige Rolle, werden die langfristige Perspektive aber nicht entscheidend ändern.

Neben Erdöl und Erdgas (und auch Kohle) besitzen wir zusätzliche Quellen „schwerer“ Kohlenwasserstoffe, beispielsweise Schwerölvorkommen in Venezuela, Ölschiefer in verschiedenen geologischen Formationen einschließlich der Rocky Mountains in den USA und riesige Teersandvorkommen in der kanadischen Provinz Alberta, um nur einige zu nennen. Die relativ stabilen Methanhydrate, die unter den sibirischen Tundren und entlang der Festlandsockel der Ozeane entdeckt wurden, bieten sich als künftige Erdgasvorkommen an. Sie werden letztlich trotz der immensen Schwierigkeiten und Kosten alle genutzt werden.

Neben dem Umfang der vorhandenen Ölreserven (1–1.5 Billionen Barrel oder etwa 200 Milliarden metrische Tonnen) müssen sowohl die ständig wachsende Weltbevölkerung (die aktuelle Zahl liegt bei über 6 Milliarden und wird vermutlich bis Mitte des 21. Jahrhunderts auf 9–10 Milliarden ansteigen) als auch der ständig steigende Lebensstandard und die wachsende Nachfrage in Ländern wie China und Indien berücksichtigt werden, will man Vorhersagen darüber machen, wie lange die

[*] Prof. Dr. G. A. Olah
Loker Hydrocarbon Research Institute and
Department of Chemistry
University of Southern California
Los Angeles, CA 90089-1661 (USA)
Fax: (+1) 213-740-5087
E-mail: olah@usc.edu

[**] Eine Monographie mit dem Titel *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*, die eine Reihe von Aspekten der Methanolwirtschaft behandelt, wird von Wiley-VCH veröffentlicht werden.

geschätzten Ölreserven reichen werden. Ausgehend von aktuellen Schätzungen unserer nachgewiesenen Ölreserven würden diese bei Fortschreibung des gegenwärtigen Verbrauchs für etwa 40 Jahre reichen. Die Erdgasreserven sind von ähnlicher, wenn auch etwas größerer Menge. Neue Entwicklungen und bessere Fördermethoden könnten die geschätzten Zeiträume allerdings erheblich verlängern.

Alternative Energiequellen

Um den stetig steigenden Energiebedarf der Menschheit zu decken, müssen alle realisierbaren alternativen Energiequellen herangezogen werden. Wasserkraft und Geothermie werden schon lange dort genutzt, wo sie die Natur zur Verfügung stellt; es wurden aber keine bedeutenderen neuen Vorkommen entdeckt. Wind- und Sonnenenergie sowie Wellen- und Gezeitenenergie bieten alle ein reales Potenzial und werden in immer stärkerem Maße genutzt. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass sie die fossilen Brennstoffe tatsächlich in großem Umfang ersetzen und so in absehbarer Zukunft unser Energiespektrum entscheidend beeinflussen zu können.^[3]

Atomenergie

Die wahrscheinlich größte technische Leistung des 20. Jahrhunderts war die Nutzbarmachung der Atomenergie. Da dieser Erfolg zum ersten Mal mit dem Bau der Atombombe erreicht wurde, wandte sich in den folgenden Jahren die öffentliche Meinung leider in immer stärkerem Maße gegen diese Energie, auch wenn es um ihre friedliche Nutzung ging. In den letzten Jahrzehnten wurden entsprechend relativ wenige neue Atomkraftwerke gebaut. Ja, in einigen Ländern gibt es sogar den starken Wunsch nach einem Schließen von Atomkraftwerken, während sie in anderen Ländern wie Frankreich etwa 80 % des Elektrizitätsbedarfs decken. Es wurden Fortschritte dabei erzielt, die Atomenergie nur zu friedlichen Zwecken zu nutzen und ihre Erzeugung ebenso wie die Lagerung und Entsorgung des radioaktiven Abfalls sicherer zu machen.

Ich glaube daran, dass unsere Gesellschaft, die in der Lage war, die Atombombe zu bauen, diese Probleme lösen kann und lösen wird. Meiner Meinung nach ist der Niedergang der Atomindustrie sehr zu bedauern. Egal ob man für oder gegen die Atomenergie ist, auf lange Sicht ist sie die brauchbarste und gewaltigste Energiequelle der Menschheit.^[4] Energieeinsparung und der Einsatz alternativer Energiequellen sind äußerst wünschenswert, genügen jedoch nicht als Ersatz für die „klassischen“ Energiequellen, um den enormen Energiebedarf der Menschheit zu decken.

Die Speicherung und Verteilung von Energie

Obwohl sie nicht erneuerbar sind und die Vorräte schwinden, werden die fossilen Brennstoffe, und insbesondere Öl und Gas, so lange es sie gibt, ihre führende Rolle als komfortabelste Quellen für Brennstoffe und als Energiequellen behalten. Für ihren Transport und ihre Verteilung existiert eine gewaltige Infrastruktur. Als Brennstoffe für unsere Autos, Lastwagen und Flugzeuge können sie in ihrer praktischen Form (Benzin, Diesekraftstoff) oder als komprimiertes Erdgas eingesetzt werden. Darüber hinaus sind sie die Grundstoffe für chemische Produkte und wichtige Materialien unseres täglichen Lebens. Der Löwenanteil fossiler Brennstoffe wird allerdings in Kraftwerken zur Erzeugung von Elektrizität verbraucht. Unabhängig von der Energiequelle, aus der Elektrizität erzeugt wird, ist deren Speichern in großem Umfang bislang nicht möglich; Batterien beispielsweise sind ineffizient und unhandlich. Neben dem Erschließen neuer Energiequellen ist es deswegen genauso wichtig, effiziente Mittel zur Speicherung und Verteilung von Energie zu finden.

Die Wasserstoffwirtschaft und ihre Schwierigkeiten

Wegen der schwindenden Vorräte an fossilen Brennstoffen ist es dringend notwendig, neue praktikable und sichere Wege zur Energiespeicherung und -verteilung zu entwickeln, unabhängig

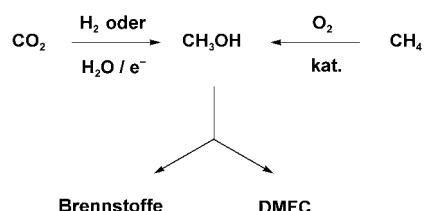
von der Quelle, aus der die Energie erzeugt wurde (atomare oder alternative Quellen), sowie effizient künstliche Kohlenwasserstoffe herzustellen.

Ein Ansatz, der in der letzten Zeit ausführlich diskutiert worden ist, ist die Erzeugung von Wasserstoff und sein Einsatz als sauberer Brennstoff – die „Wasserstoffwirtschaft“. Wasserstoff ist anders als auf anderen Himmelskörpern unseres Universums auf der Erde keine natürliche Energiequelle, da er mit dem hohen Sauerstoffgehalt unserer Atmosphäre unverträglich ist. Er verbrennt rückstandslos zu Wasser, doch seine Erzeugung erfordert viel Energie und ist nicht zwangsläufig ein rückstandsfreier Prozess. Seine derzeitige Hauptquelle ist das Reforming fossiler Brennstoffe, bei dem Synthesegas entsteht (ein Gemisch aus CO und H₂). Das erzeugte CO kann anschließend in der Wassergas-Shift-Reaktion zur weiteren Gewinnung von Wasserstoff genutzt werden. Bei diesem Prozess gehen allerdings mindestens 20 % der Energie des fossilen Brennstoffs als Wärme verloren. Eine alternative Wasserstoffquelle ist die Elektrolyse von Wasser, ein Prozess, bei dem kein CO₂ produziert wird und der keinen fossilen Brennstoff erfordert. Unsere Ozeane sind unerschöpfliche Quellen für Wasser, das zur Wasserstofferzeugung mit Atomenergie oder einer der alternativen Energien gespalten werden könnte. Doch Wasserstoff ist weder als Energiespeicher noch als Brennstoff sonderlich gut geeignet. Der Umgang mit dem flüchtigen (Sdp. -253 °C) und potenziell explosiven Wasserstoffgas erfordert besondere Bedingungen: hohen Druck, spezielle Materialien zur Minimierung von Diffusion und Leckagen sowie aufwändige Sicherheitsvorkehrungen. Selbst dann bedeutet jedwede Undichtigkeit ein Explosionsrisiko und damit Einschränkungen in der Verwendbarkeit. Dessen ungeachtet scheinen sich die USA^[5] und andere Regierungen sowie wichtige Industriebereiche immer stärker in der Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft zu engagieren. Abgesehen von den erwähnten Schwierigkeiten bei der Wasserstoffspeicherung und -lagerung ist auch die Entwicklung der für die Wasserstoffwirtschaft notwendigen Infrastruktur aus meiner Sicht ein enormes wirtschaftliches Risiko, auch wenn sie letztlich

gelingen dürfte. Die Volumenleistungsdichte von flüssigem Wasserstoff ist ebenfalls ein Nachteil (sie beträgt nur 1/3 des Wertes von Benzin); zudem erfordert das Verflüssigen von Wasserstoff erhebliche Energiemengen.^[6]

Die Methanolwirtschaft und ihre Vorteile

Methanol, das zurzeit aus auf fossilen Brennstoffen basierendem Synthesegas hergestellt wird, kann alternativ durch direkte oxidative Umwandlung von Erdgas (Methan) oder reduktive Umwandlung von atmosphärischem Kohlendioxid mit Wasserstoff gewonnen werden (Schema 1). Auf diesem

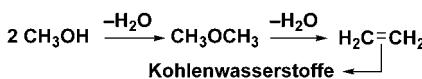


Schema 1. Gewinnung von Methanol aus atmosphärischem Kohlendioxid oder aus Erdgas (Methan) und seine Nutzung als Brennstoff. DMFC: Direktmethanol-Brennstoffzelle.

Weg könnte Wasserstoff in Form von Methanol gespeichert werden – Methanol ist ein einfach zu handhabender flüssiger Brennstoff und Grundstoff für die Synthese von Kohlenwasserstoffen und deren Folgeprodukten –, wobei Kohlendioxid aus Industrieabgasen oder aus der Atmosphäre verbraucht würde. Dies eröffnet uns die Möglichkeit, angesicht der schwindenden Öl- und Gasvorräte eine alternative Energiequelle zu erschließen und den Weg hin zu einer praktikablen „Methanolwirtschaft“ zu beschreiten.

Wegen der gravierenden Einschränkungen der Wasserstoffwirtschaft plädiere ich bereits seit einiger Zeit für eine Methanolwirtschaft als vernünftige Alternative.^[7] In Form von Methanol lässt sich Energie effizient speichern, und es kann sowohl als leicht zu handhabender Brennstoff als auch als Ausgangsmaterial für die Synthese von Kohlenwasserstoffen und deren Folgeprodukten verwendet werden.

Methanol ist selbst ein ausgezeichneter Brennstoff und kann zudem mit Benzin gemischt werden, obwohl seine Volumenenergiedichte nur halb so groß ist wie die von Benzin oder Dieselkraftstoff. Es wird auch in der Direktmethanol-Brennstoffzelle eingesetzt, die wir gemeinsam mit dem Jet Propulsion Laboratory am Caltech entwickelt haben.^[8] In dieser elektrochemischen Zelle wird Methanol direkt mit Luft zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert, wobei Elektrizität produziert wird, ohne zuvor Wasserstoff erzeugen zu müssen. Die Brennstoffzellentechnologie wird dadurch außerordentlich vereinfacht, und es erschließt sich ein breites Anwendungsgebiet für sie: beispielsweise die Stromversorgung von Mobiltelefonen und Computern (bereits in Entwicklung) sowie möglicherweise Motorrollern und Autos oder sogar die Verwendung in großen Elektrizitätswerken. Des Weiteren kann Methanol durch den MTO-Prozess (MTO: methanol to olefin) (Schema 2) auf einfache Weise in



Schema 2. Konvertierung von Methanol in Ethylen (oder Propylen) auf dem Weg zu Kohlenwasserstoffen und deren Produkten.

Ethylen oder Propylen überführt werden. Diese Olefine wiederum können zur Herstellung von komplexeren Kohlenwasserstoffen verwendet werden,^[9] die derzeit aus Öl und Gas gewonnen werden. UOP entwickelte, basierend auf der früheren Arbeit von Jule Rabo et al.,^[9d] ein industrielles Verfahren zur Herstellung von Ethylen aus Methanol unter Verwendung von sauren Zeolithkatalysatoren; auf diesem Prozess basierende Industrieanlagen werden zurzeit entwickelt.^[9e]

Im Gegensatz zu Wasserstoff, der gasförmig ist, ist Methanol eine einfach zu handhabende und unter Sicherheitsaspekten unbedenkliche Flüssigkeit (Sdp. 64.7 °C). Es ist allerdings toxisch, wenn es in den Körper aufgenommen wird (und es wird häufig als Gift bezeichnet), doch unterscheidet es sich nicht von Benzin oder Dieselkraftstoff.

Als Alternative wurde vorgeschlagen, Ethanol als Brennstoff zu nutzen, da dieser Alkohol durch Fermentierung aus Nutzpflanzen gewonnen werden kann. Seine Verwendung als Brennstoff birgt allerdings viele Nachteile, und selbst Brasilien ist dabei, sein ehrgeiziges Programm zur Umwandlung von Zuckerrohr in Ethanol als Benzinersatz zu bremsen. Auch gesamtwirtschaftlich gesehen ist die Erzeugung von Ethanol aus Nutzpflanzen als Benzinersatz nicht günstig. Der Einsatz in Brennstoffzellen wird zudem dadurch erschwert, dass die Spaltung von C-C-Bindungen schwieriger ist als die von C-H-Bindungen. Interessant ist die Tatsache, dass Lenin als erster die industrielle Nutzung von Bioalkohol kurz nach der Oktoberrevolution vorgeschlagen hat; aber selbst die Russen widersetzten sich dem „Missbrauch“ ihres heißgeliebten Wodkas, und der Plan wurde aufgegeben.

Zurzeit wird Methanol fast ausschließlich aus Synthesegas hergestellt, das durch das Reforming fossiler Brennstoffe gewonnen wird.^[9b] Solange Erdgas in ausreichender Menge zur Verfügung steht, scheint es sinnvoll, es direkt (ohne die vorherige Erzeugung von Synthesegas) in Methanol umzuwandeln. Unsere Arbeiten zur direkten oxidativen Konvertierung von Methan in Methanol haben zu großen Fortschritten geführt. Wie bereits oben erwähnt, verfügen wir über riesige Vorräte an Methanhydraten, die in den unermesslichen Weiten der subarktischen Tundren und in den Ozeanen im Bereich der Festlandsockel gebunden sind.

Das chemische Recycling von CO₂

Wie bereits erwähnt, kann Methanol auch durch die Reduktion von Kohlendioxid mit Wasserstoff hergestellt werden. Die Verbrennungsgase, die in den Kraftwerken beim Verbrennen von Kohle oder anderen fossilen Brennstoffen entstehen, können für die nähre Zukunft eine ergiebige Quelle für leicht isolierbares Kohlendioxid sein. Auch viele Industrieabgase enthalten beträchtliche Mengen an Kohlendioxid. Wasser kann den erforderlichen Wasserstoff liefern. Anstatt das Kohlendioxid lediglich zu sequestrieren, könnte man es durch diesen Prozess in nützlichen

Brennstoff umwandeln und zu einer Quelle für Kohlenwasserstoffe machen.

Für die langfristige Lösung des Problems, den Bedarf der Menschheit an Kohlenwasserstoffen zu decken, sowie für eine effiziente Speicherung von Energie, die letztlich aus nichtfossilen Brennstoffquellen erzeugt werden wird, ist die Nutzung von atmosphärischem Kohlendioxid durch seine Reduktion zu Methanol eine praktikable neue Alternative. Der Kohlendioxideinhalt in der Atmosphäre ist allerdings gering; er liegt bei 0,037%. Somit werden effiziente Wege zur CO₂-Abtrennung benötigt. Eine Möglichkeit ist die Trennung an Membranen, eine andere die selektive Absorption; bei letzterem haben unsere Forschungen zu bedeutenden Fortschritten auf dem Weg zu einer praxistauglichen Abtrennung von atmosphärischem CO₂ aus der Luft geführt. Die Überführung von CO₂ in Methanol würde zugleich das flüchtige Wasserstoffgas in eine einfach zu handhabende, unter Sicherheitsaspekten unbedenkliche Flüssigkeit umwandeln. Wenn es uns gelingt, aus atmosphärischem Kohlendioxid und Wasserstoff Methanol effizient und in großen Mengen herzustellen, könnte es Öl und Gas als Brennstoff und chemischen Grundstoff ersetzen.

Atmosphärisches Kohlendioxid steht allen Menschen auf der Erde zur Verfügung. Die Methanolwirtschaft kann die Menschheit somit endlich aus ihrer Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen befreien. Der erforderliche Wasserstoff kann durch die Elektrolyse des Ozeanwassers gewonnen werden – eine unerschöpfliche Quelle. Der benötigte Strom wird mit Atomenergie erzeugt werden (die sicherer werden wird und deren Abfallprobleme gelöst werden werden) sowie mit allen geeigneten alternativen Energiequellen (Sonne, Wind und Wasserkraft). Alternativ kann CO₂ in wässriger Lösung direkt elektrochemisch reduziert werden,^[7b] und die photochemische Reduktion von CO₂ ist ebenfalls durchführbar. Ich glaube, dass es vernünftig ist, die Methanolwirtschaft als praktischen und sinnvollen Ansatz zur letzten Ersetzung fossiler Brennstoffe zu betrachten. Sie kann einen praktikablen und sicheren Weg zur Speicherung von Energie bieten, uns einen leicht zu handhabenden flüssigen Brennstoff zur Verfügung stellen, der

Menschheit eine unbegrenzte Quelle für Kohlenwasserstoffe sichern und dabei zugleich die durch den Treibhauseffekt des Kohlendioxids hervorgerufenen Gefahren der globalen Erwärmung verringern. Im Gegensatz zum hochflüchtigen Wasserstoff ist Methanol eine einfache zu handhabende Flüssigkeit. Seine Nutzung erfordert weder die Entwicklung einer neuen, äußerst kostspieligen und nicht erprobten Infrastruktur, noch stellt es uns vor die großen Sicherheitsprobleme, die mit der Wasserstoffnutzung verbunden sind.

Bei der Hydrierung von Kohlendioxid, entweder durch katalytische Konvertierung mit H₂ oder durch elektrochemische Reduktion einschließlich der umgekehrten Nutzung der Direktmethanol-Brennstoffzelle,^[7b] entstehen neben Methanol Ameisensäure und Formaldehyd. Es ist jedoch möglich, auch diese beiden Stoffe in Methanol umzuwandeln, sodass insgesamt eine hohe Ausbeute an Methanol erzielt werden kann. Die direkte Oxidation von Methan zu Methanol (Methan steht aus den Erdgasquellen noch zur Verfügung) sollte ebenfalls in Betracht gezogen werden. Auch dabei entstehen beträchtliche Mengen an Formaldehyd und Ameisensäure. Höhere Methanol-Selkaktivitäten wurden nur bei niedrigen Umsatzzahlen erreicht.^[10] Angesichts dieser Befunde verdanken wir der Sekundärumwandlung von Formaldehyd/Ameisensäure in Methanol eine enorme Steigerung der Methanolausbeute.

Ich schlage vor, dass das Recycling von Kohlendioxid durch chemische Reduktion eine wichtige Quelle für Methanol zur Nutzung als Brennstoff und Grundstoff für synthetische Kohlenwasserstoffe und deren Produkte werden wird. Die Natur rezykliert das Kohlendioxid selbstverständlich mithilfe der durch Chlorophyll katalysierten Photosynthese der Pflanzen unter Verwendung von Wasser und Sonnenenergie. Die Bildung von Kohlenwasserstoffen aus Pflanzen ist allerdings ein sehr langer Prozess, der mehrere hundert Millionen Jahre erfordert, wenngleich eine schnellere bakterielle Umwandlung möglich ist.

Methanol war bereits früher als Brennstoff und als Brücke zu einer Zukunft, die auf erneuerbaren Energien basiert, empfohlen worden,^[11] diese An-

regungen wurden aber nie in die Praxis umgesetzt. Neben wirtschaftlichen und praktischen Faktoren war der wahrscheinlichste Grund dafür, dass Methanol, das aus auf fossilen Brennstoffen basierendem Synthesegas erzeugt wird, uns nicht aus unserer Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen befreit.

Erst eine Methanolwirtschaft, die auf dem chemischen Recycling von Kohlendioxid beruht, wird die Menschheit aus ihrer Abhängigkeit von den schwindenden natürlichen fossilen Brennstoffen befreien. Zugleich wird durch das Recycling von CO₂ aus Industrieabgasen und der Atmosphäre eine der wichtigsten vom Menschen zu verantwortenden Ursachen für die globale Erwärmung abgeschwächt. Das Sammeln und Sequestrieren von CO₂ in unterirdischen Höhlen oder auf dem Meeresgrund ist kostspielig und keine dauerhafte Lösung, und es hilft auch nicht, den künftigen Bedarf an Kohlenwasserstoffen zu decken. Das immer noch umstrittene Kyoto-Protokoll, mit dem die CO₂-Emissionen begrenzt werden sollen, wäre sehr viel eher umsetzbar, wenn wir über neue Technologien, wie das chemische Recycling von überschüssigem Kohlendioxid in der Atmosphäre, verfügen.

Letztendlich kommt all unsere Energie von der Sonne. Da diese noch mindestens 4,5 Milliarden Jahre existieren wird, hat die Menschheit eine Unmenge an Zeit, um Methoden zur Nutzung ihrer Energie zu entwickeln. Wir können uns in keiner Weise die Fortschritte vorstellen, die künftige Generationen machen werden. Die Diskussionen über das, was nach unserer derzeitigen Öl- und Gaswirtschaft geschehen wird, betreffen lediglich die absehbare Zukunft. Dennoch ist die Entwicklung effizienter Methoden zur Speicherung von Energie und zur Herstellung praktischer Brennstoffe und anderer Produkte auf Kohlenwasserstoffbasis, die zugleich durch das Recycling von Kohlendioxid zu einer Verringerung der globalen Erwärmung beitragen, von entscheidender und langfristiger Bedeutung für unser Leben.

In der vorgeschlagenen Methanolwirtschaft wird Methanol auf drei Arten genutzt: 1) als leicht zu handhabendes Mittel zur Speicherung von Energie, 2) als Brennstoff und 3) als Rohstoff

zur Synthese von Kohlenwasserstoffen und deren Folgeprodukten.

Online veröffentlicht am 31. März 2005
Übersetzt von Charlotte Gentes,
Maulbronn

- [1] B. Freese, *Coal, A Human History*, Perseus Publishing, Cambridge, **2003**.
- [2] BP Statistical Review of World Energy, Juni 2004, zu finden unter <http://www.bp.com/statisticalreview2004>.
- [3] *Energy Technologies for the 21st Century*, International Energy Agency, Paris, **1997**.
- [4] R. C. Morris, *The Environmental Case for Nuclear Power*, Paragon House, St. Paul, MN, **2000**.
- [5] National Hydrogen Energy Road Map, US Department of Energy, November 2002.
- [6] a) „*Toward a Hydrogen Economy*“, editorial and special issue: *Science* **2004**, 305, 957; b) J. J. Romm, *The Hype About Hydrogen*, Island Press, Washington, **2004**.
- [7] a) „The Search for New Technical Solutions for an Environmentally Sustainable Future: Recycling Carbon Dioxide into Useful Fuels“: G. A. Olah in *Partnership for Global Ecosystem Management* (Hrsg.: I. Serageldin, J. Martin-Brown), Proceedings from the 5th Annual World Bank Conference, 6.–7. Oktober 1997, Washington DC, **1998**, S. 65; b) G. A. Olah, G. K. S. Prakash, US-Patent 5928806, **1999**; c) G. A. Olah, *Chem. Eng. News* **2003**, 81 (38), 5; d) G. A. Olah, *Chem. Eng. News* **2003**, 81 (38), 42; e) G. A. Olah, *Catal. Lett.* **2004**, 93, 1; f) G. A. Olah in *Chemical Research—2000 and Beyond, Challenges and Vision* (Hrsg.: P. Barkan), American Chemical Society, Washington DC, and Oxford University Press, **1998**, S. 40–54.
- [8] a) S. Surumpudi, S. R. Narayanan, E. Vamos, H. Frank, G. Halpert, A. Lacomonti, J. Kosek, G. K. S. Prakash, G. A. Olah, *J. Power Sources* **1994**, 47, 217; b) S. Surumpudi, S. R. Narayanan, E. Vamos, H. Frank, G. Halpert, G. K. S. Prakash, G. A. Olah, US-Patent 6248460, **2001**; c) S. Surumpudi, S. R. Narayanan, E. Vamos, H. Frank, G. Halpert, G. K. S. Prakash, G. A. Olah, US-Patent 5599638, **1997**; d) S. Surumpudi, S. R. Narayanan, E. Vamos, H. A. Frank, G. Halpert, G. A. Olah, G. K. S. Prakash, US-Patent, 6444343, **2002**; e) G. K. S. Prakash, M. C. Smart, Q. J. Wang, A. Atti, V. Pleynet, B. Yang, K. McGrath, G. A. Olah, S. R. Narayanan, W. Chun, T. Valdez, S. Surumpudi, *J. Fluorine Chem.* **2004**, 125, 1217.
- [9] a) G. A. Olah, H. Doggweiler, J. D. Felsing, S. Frohlich, M. J. Gridinina, R. Karpeles, T. Keumi, S. Inaba, W. M. Ip, K. Lammertsma, G. Salem, D. C. Tabor, *J. Am. Chem. Soc.* **1984**, 106, 2143; b) J. B. Hansen in *Handbook of Heterogeneous Catalysis* (Hrsg.: G. Ertl, H. Knözinger, J. Weitkamp), VCH, Weinheim, **1997**, S. 1856; c) C. D. Chang in *Handbook of Heterogeneous Catalysis* (Hrsg.: G. Ertl, H. Knözinger, J. Weitkamp), VCH, Weinheim, **1997**, S. 1894, zit. Lit.; d) J. A. Rabo, *Stud. Surf. Sci. Catal.*, Proc. 10th Int. Congress on Catalysis (Hrsg.: L. Guczi, F. Solymosi, P. Tétényi), Budapest, **1992**, 75A, 1; e) „MTO: Meeting the Needs for Ethylene and Propylene Production“: J. Andersen, S. Bakas, T. Foley, J. Gregor, B. Vora, S. Kvistle, H. Reier Nilsen, T. Fuglerud, A. Grønvold, ERTC Petrochemical Conference, Paris, **2003**.
- [10] H. Crabtree, *Chem. Rev.* **1995**, 95, 987.
- [11] a) C. L. Gray, Jr., J. A. Alson, *Moving America to Methanol*, University Michigan Press, Ann Arbor, **1985**; b) „Methanol“: T. B. Reed, R. M. Lerner, *Science* **1973**, 182, 1299; c) J. H. Perry, Jr., C. P. Perry, *Methanol: Bridge to a Renewable Future*, Universiy Press of America, New York, London, **1990**; d) *Methanol as an Alternative Fuel Choice: An Assessment* (Hrsg.: W. L. Kohl), The John Hopkins Foreign Policy Institute, Washington, **1990**.