



Der Weg in die Unabhängigkeit vom Öl mithilfe einer Chemie auf der Basis von erneuerbarem Methanol

George A. Olah*

Bireforming · CO₂-Recycling · Erneuerbares Methanol ·
Kohlenstoffkreislauf · Methanolwirtschaft

Einleitung

Seit der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert dienen die fossilen Brennstoffe Kohle, Öl und Erdgas der Menschheit als billige und gut zugängliche Energie sowie als Rohstoffe für eine Vielzahl von Produkten und Materialien. Doch dieses sehr wertvolle Geschenk der Natur wird mehr und mehr verbraucht und erschöpft sich allmählich. In den 1860er Jahren galt Erdöl als wichtigster Grundstoff für den Brennstoff in den Petroleumlampen, danach folgte seine Verwendung als Heizöl und für andere Zwecke, darunter schließlich auch die Erzeugung von elektrischem Strom. Seit der Erfindung des Verbrennungsmotors in Autos und anderen Fahrzeugen, später Flugzeugen und anderen Fortbewegungsmitteln, wurde Erdöl essenziell für die Produktion von Kraftstoffen. Auch als Rohstoff für petrochemische und chemische Erzeugnisse stieg seine Bedeutung. Wegen der wachsenden Bevölkerung und dem steigenden Lebensstandard nimmt auch der Bedarf an Erdöl weiter zu. Unsere Ölreserven sind jedoch begrenzt und befinden sich zum großen Teil im Nahen Osten und anderen politisch eher instabilen Gegenden, weshalb sie tendenziell mit einem großen Risiko behaftet sind. Dank neu entdeckter Vorkommen (einschließlich Schiefergas), fortschrittlicherer Techniken, Einsparungen und verbesserter Nutzungsmethoden – wie auch Änderungen des wirtschaftlichen Klimas – bleibt relativ „billiges Öl“ noch länger, doch wohl nur ein paar Jahrzehnte länger, verfügbar. Allen Schätzungen nach werden wir auch weiterhin mit steigender Knappheit und dadurch verursachten Preiserhöhungen rechnen müssen. Daher ist anzunehmen, dass sich bis zum Ende des Jahrhunderts die Verfügbarkeit und die Nutzung von Erdöl grundlegend wandeln werden. Die Zeit, Ersatz für Erdöl zu finden, ist ganz klar jetzt.^[1,2]

Um das Problem der schwindenden Ölreserven zu lösen, wendet sich die Welt bereits dem in größerer Menge vorhandenen Erdgas zu, aber auch dieses wird nur eine begrenzte Zeit reichen. Unsere Aufgabe ist es, Wege zu finden, wie wir mehr und mehr auf Öl verzichten und gleichzeitig die Bedürfnisse der wachsenden Weltbevölkerung befriedigen und die Qualität unserer Umwelt bewahren können. Diesen Fra-

gen zu unserem Kohlenstoffproblem wurde bereits in hervorragenden Büchern nachgegangen.^[1,2]

In diesem Essay soll weder der Energiebedarf der Menschheit noch die Verfügbarkeit von Energie detailliert diskutiert werden. Grob gesagt stammt die meiste Energie auf der Erde direkt von der Sonne oder leitet sich in irgendeiner Form aus der Sonnenenergie her. Daher „produzieren“ wir keine Energie, sondern nutzen nur, was uns die Natur zur Verfügung stellt oder was Atome durch Kernspaltung oder – künftig – durch kontrollierte Kernfusion an Energie „freisetzen“. Dieser Essay beschreibt unseren Ansatz, das schwindende Erdöl durch erneuerbares Methanol zu ersetzen, eine Fortsetzung unserer Arbeiten zur Kohlenwasserstoffchemie.^[3] Die Hintergründe werden in einer Monographie ausführlich dargestellt, die ich zusammen mit Goeppert und Prakash verfasst habe,^[4] und dort werden auch die überaus wertvollen Arbeiten anderer zu diesem Thema gewürdigt. Im Wesentlichen befasst sich der Text jedoch mit der von mir in den 1990er Jahren ins Leben gerufenen Methanolwirtschaft und ihrem jetzigen Entwicklungsstand.

Methanol als wirtschaftlicher und praxistauglicher Ersatz für Öl

Unsere Vorräte an Kohle und Erdgas übertreffen bei weitem die Vorräte an Öl. Schon früh wurde daher erkannt, dass technische Prozesse entwickelt werden müssen, um diese Rohstoffe in synthetisches Öl und davon abgeleitete Kohlenwasserstoffe umzuwandeln. Dieses Ziel wird bis heute verfolgt.

Zwei Ansätze sind in der Vergangenheit für die Synthese von synthetischem Öl und seinen Produkten entwickelt worden. Der eine beruht auf der Kohleverflüssigung, die in den 1920er Jahren in Deutschland in Form der Fischer-Tropsch-Synthesegaschemie entwickelt wurde, um die allgegenwärtige Kohle in flüssige Rohstoffe zu überführen. Später wurden die Verfahren auf die Umwandlung von Erdgas in flüssige Kohlenwasserstoffe ausgedehnt (Gas-to-Liquid(GTL)-Technologien). Keiner dieser Wege ist jedoch auf Nachhaltigkeit oder Bewahrung der Umwelt angelegt. Auch heute noch werden Synthesegasprozesse von der chemischen und petrochemischen Industrie in großem Umfang genutzt. Synthesegas ist eine Mischung aus CO und H₂ mit variabler Zusammensetzung. Das Verhältnis der beiden Hauptkomponenten reicht

[*] Prof. Dr. G. A. Olah
Loker Hydrocarbon Research Institute
University of Southern California
Los Angeles, CA 90089-1661 (USA)

von 1:1 bis 1:3. Um daraus synthetische Ölprodukte zu erhalten, müssen komplexe mehrstufige Verfahren mit all ihren Kosten und Einschränkungen angewendet werden. Die Zusammensetzung des Synthesegases kann durch getrennte Dampf- und Trockenreformierung, die Wassergas-Shift-Reaktion und anderes eingestellt werden. Unser „Bireforming“-Prozess produziert dagegen ausschließlich eine CO/H_2 -Gas-mischung im Verhältnis 1:2, die den Namen „Metgas“ trägt und deren einziger Zweck die Herstellung von Methanol ist.

All denjenigen, die am historischen Hintergrund der Ölfrage interessiert sind, möchte ich die Bücher von Daniel Yergin „*The Prize*“ und „*The Quest*“^[5,6] ans Herz legen, die allgemeinverständlich geschrieben sind und sich mit den großen Fragestellungen von Energie, Sicherheit und der Neuerfindung der modernen Welt befassen.

In meinem früheren Essay „*Jenseits von Öl und Gas: die Methanolwirtschaft*“^[7] beschrieb ich das Konzept und die Entwicklung einer neuen Chemie zur Nutzung von Methanol (das damals aus Synthesegas ausschließlich von fossilen Quellen hergestellt wurde) als Treibstoff, Energiespeichermedium (Methanol ist ein praktischer „flüssiger Wasserstoff“), Träger und Rohstoff für Produkte und Materialien, die derzeit hauptsächlich aus Öl gewonnen werden. Alle früheren wichtigen Arbeiten und Entwicklungen werden in unserer Monographie und in einigen Übersichtsartikeln gewürdigt.^[8,10,11]

Yergin diskutiert in seinen Büchern auch alternative Energiequellen wie Wasserstoff, Geothermie, Sonne, Wind sowie die Atomenergie und weist auf deren Vor- und Nachteile hin (Verfügbarkeit, Kosten, Sicherheit, Transport und die Notwendigkeit der Speicherung). Hier sollte auch angemerkt werden, dass in Kalifornien in den 1980er und 1990er Jahren Methanol in gewissem Umfang als Kraftstoff verwendet wurde (als M-15, M-85 und sogar M-100), was dann aber wieder gestoppt wurde. Des Weiteren befasste sich Mobil in Neuseeland intensiv mit der Umwandlung von handelsüblichem Methanol in Benzin (Methanol-to-Gasoline, MTG). Doch als man die Auswirkungen der kurzzeitigen heftigen Ölkrisen vergessen hatte, wurden auch diese Arbeiten eingestellt. Als die OPEC gegründet wurde und eine reichliche Versorgung gesichert schien, richtete sich der Öl-weltmarkt auf einem Preisniveau von weniger als 20 \$ pro Barrel ein. Auf diesem Niveau blieb er auch eine Zeitlang, aber seitdem sind die Preise infolge der gestiegenen Nachfrage, des wachsenden Verbrauchs und der schwindenden Vorräte auf das Fünffache gestiegen. Derzeit liegt der Preis bei etwa 100 \$ pro Barrel mit unerbittlich steigender Tendenz, auch wenn es immer wieder zwischenzeitliche Preisfluktuationen geben wird.

Inzwischen ist das Konzept der Methanolwirtschaft, das ich in meinem früheren Essay umrissen habe,^[7] auf einer viel ausgereifteren Stufe. Auch bei der praktischen Anwendung gibt es Fortschritte. So betreibt die Firma Carbon Recycling International in Island mittlerweile auf Geothermiebasis eine erste kommerzielle Anlage zur Umwandlung von CO_2 in erneuerbares Methanol (Abbildung 1). Eine wachsende Zahl an Staaten, von China bis zur EU und auch die USA, meldet ein steigendes Interesse an Methanol und seinen Derivaten (synthetische Kraftstoffe, Dieselöl, Dimethylether (DME)



Abbildung 1. Die „George Olah Carbon Dioxide to Renewable Methanol Plant“ von Carbon Recycling International in Island, die die lokale geothermische Energie nutzt. Sie ist die erste kommerzielle Anlage zum Recycling von Kohlendioxid in der Welt (ich danke K. C. Tran, CEO, Carbon Recycling International, Island).

und andere chemische Produkte) an, um die schwindenden Ölreserven zu ersetzen.

Allerdings entsteht bei der Verbrennung oder oxidativen Nutzung aller kohlenstoffhaltigen Kraftstoffe und Materialien immer CO_2 . Für die Methanolwirtschaft essenziell ist, dass dieses CO_2 abgefangen und dann zu Methanol rezykliert wird („Carbon Capture and Recycling“, CCR), was das Methanol erneuerbar macht, und nicht nur abgefangen und gespeichert („Carbon Capture and Storage“, CCS). Der für das Kohlenstoffrecycling benötigte Wasserstoff kann aus Erdgas, Schiefergas und anderen Methanquellen oder durch Elektrolyse (oder Spaltung) von Wasser gewonnen werden, und als Prozesswärme eignet sich jede verfügbare alternative Energie. Mit diesem Ansatz werden wir zunehmend unabhängig vom Erdöl als Rohstoff für Kraftstoffe, chemische Produkte und Materialien. Keinesfalls soll jedoch der Eindruck entstehen, dies sei die einzige oder die ultimative Lösung für unser Kohlenstoffproblem, aber sie ist machbar und ökonomisch.

In den letzten Jahren haben wir zudem die „Direct oxidation methanol fuel cell“ (DMFC) entwickelt, d. h., in einer Brennstoffzelle wird direkt aus Methanol Strom erzeugt. Im umgekehrten Modus kann sie als regenerative Brennstoffzelle arbeiten und somit CO_2 rezyklieren.^[4] Rezykliertes CO_2 kann die übermäßigen CO_2 -Emissionen abfedern und sich so günstig auf die zunehmende Erderwärmung und die Klimaänderung auswirken.^[8b]

Das chemische Kohlenstoffrecycling ergänzt den natürlichen Photosynthesekreislauf. Unsere wichtigen Entdeckungen zum und unser geistiges Eigentum am erneuerbaren Methanol sind in etwa 25 Patenten und Patentanmeldungen offengelegt und geschützt. Weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen und die zweite, erweiterte und aktualisierte Ausgabe unserer Monographie von 2009 enthalten viele Beschreibungen und Einzelheiten.^[4]

Methanol ist eine bei Raumtemperatur gut zu handhabende Flüssigkeit, die sich problemlos lagern, transportieren und mit weitgehend vorhandener Infrastruktur auch gut ver-

teilen lässt. Für eine Reihe von Verbrennungsmotoren ist Methanol ein hervorragender Kraftstoff. So kann es durch Dehydratisieren leicht in Dimethylether (DME) umgewandelt werden. DME verbrennt sauber, hat eine hohe Cetanzahl und kann somit Diesel ersetzen. In neu entwickelten Dieselmotoren mit Fremdzündung kann Methanol auch direkt verwendet werden. DME wiederum kann anstelle von Flüssiggas (LPG; meist eine Mischung aus Butan und Propan), komprimiertem Erdgas (CNG) und Flüssigerdgas (LNG) in vielen Haushaltsanwendungen wie Heizen oder Kochen (Gasofen) genutzt werden. Daneben kann Methanol auch Erdöl als Schlüsselverbindung der petrochemischen und chemischen Industrie ersetzen, denn es lässt sich leicht in Ethylen und Propylen überführen. Allerdings wird für diese Art der Nutzung das Gleiche gelten, das heute beim Erdöl gilt: Sie wird weniger als 10% der Nutzung als Treibstoff betragen. Inzwischen wurden neue Gasreserven wie Schiefergas, Kohleflöz-Methan und letztlich auch Methanhydrat, das in größeren Mengen vorkommt als konventionelles Erdgas, erschlossen, was die Ressourcen für die hier diskutierte Methanolchemie erweitert.

Das für die Methanolchemie benötigte Kohlendioxid kann natürlichen und anthropogenen Quellen, einschließlich Erd- und Schiefergas (durch deren Verbrennung), entnommen werden. Zunächst könnten für die Umwandlung von CO₂ in Methanol sicherlich die hochkonzentrierten Abgase von Kraftwerken, Chemie- und Gäranlagen (Brauereien) sowie diverse natürliche Quellen wie CO₂ in Erdgas und CO₂ geothermischen Ursprungs genutzt werden. Später könnte auch CO₂, dessen steigender Gehalt in unserer Atmosphäre (ca. 390 ppm) signifikant zur globalen Erwärmung beiträgt, direkt aus der Luft verwendet werden.^[9] Das Abtrennen und Recycling von CO₂ ist praktisch durchführbar, wenn kostengünstige Energien als Prozessenergie verwendet werden, und wird erforscht. Mehr und mehr stehen für das chemische CO₂-Recycling auch Energien nichtfossilen Ursprungs wie die Solar-, Wind-, Wasser-, geothermische oder sogar Kernenergie zur Verfügung (bei letzterer müssten aber das Risiko von Unfällen und die Auswirkungen von Naturkatastrophen noch erheblich verringert werden).

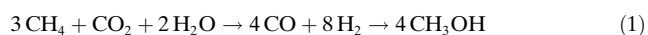
Das von der Natur in Form der Photosynthese betriebene natürliche Recycling von CO₂ regte die Entwicklung von agrarwirtschaftlich erzeugten Biokraftstoffen wie dem aus Mais oder Zucker hergestellten Bioethanol oder dem Biodiesel aus pflanzlichen Ölen an. Allerdings greifen diese Biokraftstoffe in die Nahrungskette ein, führen zu höheren Lebensmittelpreisen und wirken sich klar negativ auf die Umgebung aus. Eine nachhaltige Lösung ist die Verwendung von natürlicher Vegetation und nichtessbaren Kulturpflanzen, Abfallbiomasse und Cellulose. Dennoch decken die Biokraftstoffe nur einen kleinen Teil unseres Gesamtkraftstoffverbrauchs.

Produktion von erneuerbarem Methanol

Lange Zeit stellte man Methanol aus fossilen Brennstoffen (Öl, Erdgas, Kohle) mit konventioneller Synthesegaschemie her.^[8] Haldor Topsøe entwickelte die partielle Oxi-

dation von Erdgas durch autotherme Reformierung, bei der CO₂ in einem Prozess namens Trireforming teilweise rezykliert wird.^[8f] Dieses Verfahren nutzt die In-situ-Verbrennung von Erdgas mit zugefügtem Sauerstoff (oder Luft) zur Erzeugung der notwendigen Prozessenergie. CO₂ wird dabei in großen Mengen produziert und entweder rezykliert oder aufgefangen und gespeichert (CCS). Dieses mehrstufige Verfahren ist jedoch sehr kostenintensiv und erzeugt viel Abfall.

Anders als in konventionellen Synthesegasmischungen liegt bei unserem einstufigen Prozess für erneuerbares Methanol nur eine 1:2-CO/H₂-Mischung namens „Metgas“ vor, die ausschließlich in die Methanolproduktion eingeht. Die Reaktionskomponenten für das Metgas sind Methan (oder Erdgas), CO₂ und Dampf im Verhältnis 3:1:2. Als Quelle für das Methan (oder Erdgas) eignen sich, wie bereits gesagt, mehrere Ressourcen. Für das Kohlendioxid steht eine Reihe von natürlichen oder industriellen Quellen zur Verfügung, einschließlich der Abgase der Verbrennung von Erd- und Schiefergas, die zugleich die Wärme für diese Prozesse liefern kann. Wenn nötig ist auch eine Vorreinigung, hauptsächlich um das Katalysatorgift H₂S zu entfernen, möglich. Die Reaktion wird am besten in einem Druckflusssystem bei Temperaturen von 800–1000 °C und Drücken von 5–40 bar über einem Nickelkatalysator durchgeführt [Gl. (1)]. Metgas wird dann in einem ausgereiften Verfahren mit hohen Ausbeuten in hochreines Methanol überführt.



Es ist auch möglich, für dieses Bireforming direkt Erd- oder Schiefergas mit Beimengungen von höheren Alkanen einzusetzen. Um im Metgas dann das gewünschte CO/H₂-Verhältnis zu erreichen, müssen nur die Dampf- und CO₂-Anteile angepasst werden. In fernerer Zukunft könnten auch die großen Methanhydratvorkommen im Kontinentalschelf der Ozeane oder unter der arktischen Tundra, die uns noch jahrhundertlang mit Methan versorgen können, für diesen Prozess verwendet werden.

Das Wasser für das Bireforming kann von überall her kommen, muss aber „sauber“, also von Salz (im Fall von Meerwasser) und anderen Verunreinigungen befreit sein. Unsere Atmosphäre selbst enthält je nach Örtlichkeit 2–8% Feuchtigkeit, die abgetrennt und für das Bireforming direkt genutzt werden kann.

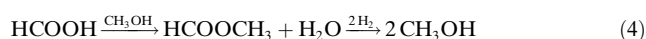
Einer der großen Vorteile des Bireforming ist seine Einstufigkeit. Da viele Erdgasquellen schon erhebliche Mengen CO₂ enthalten und die für das Bireforming erforderliche Methan/CO₂-Mischung damit leicht eingestellt werden kann, kann auf eine vorgeschaltete Abtrennung verzichtet werden.^[10,11]

CO₂ kann auch durch Hydrierung über Heterogenkatalysatoren in Methanol umgewandelt werden, z.B. über Kupfer-Zinkoxid-Aluminiumoxid-Katalysatoren bei 220–250 °C und 10–30 bar. Der Wasserstoff kann durch Wasserelektrolyse (eine ausgereifte Technik) erzeugt werden, allerdings wird bei der Herstellung von Methanol ein Drittel des produzierten Wasserstoffs wieder in Wasser umgewandelt [Gl. (2)].

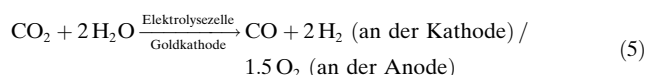


Die beschriebene Technologie wird bereits durch Carbon Recycling International (CRI) in Island kommerziell genutzt, wobei das benötigte CO_2 aus dem Geothermiedampf abgetrennt wird. Die derzeitige Jahresproduktion von 3500 Tonnen soll auf 35 000 Tonnen ausgebaut werden. In Japan fährt Mitsui Chemicals mit CO_2 , das als Nebenprodukt in anderen Prozessen anfällt, eine Pilotanlage von ungefähr 100 Jahrestonnen. Auch in anderen Ländern werden Forschung und Entwicklung aktiv vorangetrieben.

Bei einem derzeit in Entwicklung befindlichen Verfahren zum elektrochemischen Recycling von CO_2 wird zunächst das CO_2 selektiv zu Ameisensäure reduziert [Gl. (3)]. Diese wird dann mit Methanol zu Methylformiat umgesetzt und das katalytisch mit Wasserstoff zu genau zwei Moläquivalenten Methanol reduziert [Gl. (4)].^[10,11] Ameisensäure selbst ist zudem ein ausgezeichneter Wasserstoffspeicher.^[12]



CO_2 kann auch elektrochemisch über Goldkatalysatoren zu CO reduziert werden. Wenn dieses Verfahren mit einer Elektrolyse kombiniert wird, entsteht Metgas für die Produktion von Methanol an der Kathode der Elektrolysezelle [Gl. (5)].^[10,11]

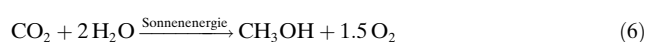


Unser CCR-Verfahren kann auch für die Umwandlung der Kohlenstoffemissionen von Kohle- oder Erdgas-Kraftwerken in Methanol und sogar erneuerbares Methanol genutzt werden.^[10,11] Dies würde die Emissionen aus fossile Energieträger nutzenden Kraftwerken vermindern oder sogar nahe an die Kohlenstoffneutralität bringen.

Schlussfolgerungen

Wir haben einen Kohlenstoffkreislauf vorgeschlagen und entwickelt, bei dem durch chemisches Recycling von Kohlendioxid erneuerbares Methanol im Wesentlichen kohlenstoffneutral produziert und genutzt wird. Der Prozess kann entweder als Bireforming mit Methan aus derzeit verfügbaren Methan(Erdgas)-Quellen ablaufen oder als CO_2 -Hydrierung, für die Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse eingesetzt wird. Als Prozessenergien eignen sich sämtliche konventionellen Energien (außerhalb der Stoßzeiten) und alternative Energien. Mit abnehmenden Reserven an fossilen Brennstoffen werden zunehmend Energien aus Wasserkraft, Erdwärme und Atomkraft zum Einsatz kommen, im Wesentlichen aber Wind- und Sonnenenergie. Und in fernerer Zukunft kann dann unsere Atmosphäre selbst die Materialien CO_2 und Wasser liefern. Mit der unerschöpflichen Sonnenenergie wird dann aus diesen Grundstoffen Methanol und Sauerstoff produziert. Dies läuft entweder elektrochemisch oder durch

chemische Hydrierung gemäß dem in Gleichung (6) zusammengefassten Gesamtprozess ab.^[10,11]



Fortschritt braucht Zeit, aber ich glaube, dass die Basis für ein effektives und praxistaugliches Kohlenstoffrecycling durch Umwandlung von CO_2 in Methanol (CCR) gelegt ist und dass das Verfahren zunehmend Eingang in die industrielle Praxis findet. Für den Rest dieses Jahrhunderts werden weiterhin Erd- und Schiefergas sowie andere Methanquellen genutzt werden. Sobald diese Quellen versiegt sind, können wir den für das CO_2 -Recycling erforderlichen Wasserstoff aus der Wasserspaltung beziehen, wobei erneuerbare Energie oder Atomenergie genutzt werden wird. Auch der Ersatz von Erdöl durch erneuerbares Methanol wird mithilfe des CCR-Verfahrens möglich. Zugleich vermag die Methanolwirtschaft die Auswirkungen von umweltschädlichen CO_2 -Emissionen (globale Klimaänderung) zu lindern. Unsere Abfang- und Recyclingtechnologie, die den natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Photosynthese ergänzt, bietet eine nachhaltige und praxistaugliche Lösung für unser Brennstoff- und Rohstoffproblem.

Prof. G. K. Surya Prakash, mein ehemaliger Student, mein Freund und seit fast 35 Jahren mein Kollege und Partner, war eine der prägenden Gestalten in der Entwicklung unseres Konzepts einer Methanolwirtschaft und von erneuerbarem Methanol. Seine Beiträge zu und seine zunehmende Verantwortung in der Leitung unserer gemeinsamen Forschung waren essenziell. Ich danke allen an unseren Arbeiten beteiligten Kollegen, insbesondere Dr. Alain Goeppert sowie den Drs. Thomas Mathew, Miklos Czaun, Robert Aniszfeld, Sergio Meth und Patrice Batamack, und den anderen Kollegen am Loker Hydrocarbon Research Institute. Ihre Namen sind in unseren Veröffentlichungen und in der Monographie zu finden. Das Institut selbst und die University of Southern California förderten einen Großteil der Forschung. Unsere Forschung wurde außerdem durch die Hydrocarbon Research Foundation und in den letzten Jahren auch durch das U.S. Department of Energy unterstützt. Die Konzepte der Methanolwirtschaft sind als geistiges Eigentum der University of California geschützt.

Eingegangen am 26. Juni 2012,
veränderte Fassung am 6. September 2012
Online veröffentlicht am 3. Dezember 2012
Übersetzt von Dr. Roswitha Harrer, Otterberg

- [1] K. S. Deffeyes, *Beyond Oil*, Hill and Wang, New York, **2005**.
- [2] D. Goodstein, *Out of Gas, The End of the Age of Gold*, Norton, **2004**.
- [3] G. A. Olah, A. Molnar, *Hydrocarbon Chemistry*, 2. Aufl., Wiley, New York, **2003**, zit. Lit.
- [4] G. A. Olah, A. Goeppert, G. K. S. Prakash, *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*, 2 Aufl., Wiley-VCH, Weinheim, **2009** (1 Aufl. **2006**), zit. Lit.
- [5] D. Yergin, *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power*, Simon and Schuster, New York, **1991**, zit. Lit.; deutsche Über-

setzung: D. Yergin, *Der Preis. Die Jagd nach Öl, Geld und Macht*, S. Fischer, Frankfurt, **1991**.

- [6] D. Yergin, *The Quest: Energy, Security and the Remaking of the Modern World*, Penguin Press, New York, **2011**, zit. Lit.
- [7] G. A. Olah, *Angew. Chem.* **2005**, *117*, 2692–2696; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 2636–2639.
- [8] a) F. Asinger, *Methanol: Chemie- und Energierohstoff*, Springer, Heidelberg, **1986**; b) J. H. Perry, Jr., C. P. Perry, *Methanol: Bridge to a Renewable Energy Future*, University Press of America, Lanham, MD, **1990**; c) J. K. Paul, *Methanol Technology and Application in Motor Fuels*, Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ, **1978**; d) C. L. Gray, Jr., J. A. Alson, *Moving America to Methanol*, University of Michigan Press, Ann Arbor, **1985**; e) *Methanol as an Alternative Fuel Choice: An Assessment* (Hrsg.: W. L. Kohl), John Hopkins Foreign Policy Institute, Washington, DC, **1990**; f) J. Rostrup-Nielsen, *Concepts in Syngas Manufacture*, Imperial College Press, London, **2011**.
- [9] a) A. Goeppert, M. Czaun, G. K. S. Prakash, G. A. Olah, *Energy Environ. Sci.* **2012**, *5*, 7833–7853, zit. Lit.; b) A. Goeppert, S. Meth, G. K. S. Prakash, G. A. Olah, *Energy Environ. Sci.* **2010**, *3*, 1949–1960; c) S. Meth, A. Goeppert, G. K. S. Prakash, G. A. Olah, *Energy Fuels* **2012**, *26*, 3082–3090.
- [10] G. A. Olah, A. Goeppert, G. K. S. Prakash, *J. Org. Chem.* **2009**, *74*, 487–498, zit. Lit.
- [11] G. A. Olah, G. K. S. Prakash, A. Goeppert, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 12881–12898, zit. Lit.
- [12] M. Czaun, A. Goeppert, R. May, R. Haiges, G. K. S. Prakash, G. A. Olah, *ChemSusChem* **2011**, *4*, 1241–1248.