Martin Bertau

Die Sonne im Tank – zum Potenzial Grüner Kraftstoffe aus Sicht der Chemie

Energiewende, Dieselgate, Decarbonisierung – unsere Zeit ist reich an Schlagworten, die durch die Medien gehen. Alle beanspruchen für sich, mehr oder weniger tiefgreifend einen Systemwechsel herbeizuführen, weg vom Althergebrachten, hin zum Neuen. Was aber ist eigentlich die Energiewende? Sie wurde 2010 – vor acht Jahren also – ausgerufen und bis heute fehlt ein strategisches Konzept. Nimmt man es genau, handelt es sich bei dem, was wir unter diesem Begriff verstehen, in Wahrheit um eine Elektrizitätswende, denn elektrische Energie macht gerade einmal 16 % der nationalen Energieerzeugung aus.[1] Der weit überwiegende Anteil umfasst Mobilität, Heizung (Privathaushalte) oder Prozessenergie (Industrie). Davon indes hört man wenig. Gelegentlich gibt es Äußerungen, die die Energiewende mit einer sogenannten Decarbonisierung in Verbindung bringen, die zwingend mit Nachdruck voranzutreiben sei. Solche Statements sind symptomatisch für eine Schlagwortpolitik: Weder wird das Problem benannt bzw. die Problemstellung so begründet, dass sie einer wissenschaftlich-technischen Überprüfung standhält, noch werden explizit die Ziele benannt, die zu erreichen als erstrebenswert angesehen wird und deren Realisierbarkeit in den eventuell genannten Zeiträumen ebenfalls eine wissenschaftlich-technische Nagelprobe besteht. Es fehlen also Ansätze, wie es besser gehen könnte. Das Gefährliche daran ist die damit induzierte Perspektivlosigkeit. Natürlich gibt es keinen Grund, nach dem Motto eines ›weiter so‹ an bisherigen Konzeptionen festzuhalten und die Augen vor Neuentwicklungen zu verschließen. Wenn aber wie in der bekannten Weise mit der Energiewende verfahren wird, den Bürgern vorgegaukelt wird, man könne bis zum Jahr 2020 eine Million Elektroautos auf deutschen Straßen fahren sehen, wenn eine Decarbonisierung gefordert wird, die eine Defossilierung meint (wir alle ernähren uns von kohlenstoffbasierten Lebensmitteln), dann ist die Gefahr groß, dass sich die Allgemeinheit Neuentwicklungen verschließt, dass

1 G. Herbert Vogel, »Chemie erneuerbarer kohlenstoffbasierter Rohstoffe zur Produktion von Chemikalien und Kraftstoffen«, in *Chemie Ingenieur Technik* 86 (2014), S. 2135–2149.

weiterführende, zielführende Konzepte seitens der Industrie nicht aufgegriffen werden, weil hinter allen Lösungsvorschlägen Inhaltsleere befürchtet wird. Die schlechte Konnotation der Energiewende führt letztlich dazu, dass die ihr innewohnenden Chancen nicht gesehen werden, die darin liegenden Perspektiven für die Industrie in der Unsicherheit untauglichen Vokabulars verschwimmen.

Aber was spricht eigentlich dagegen, die Energiewende als Chance statt als Problem zu begreifen? Bei einer nüchternen Betrachtung ist die der Energiewende zugrunde liegende Idee nichts wirklich Neues. Vieles, was man darunter subsumieren könnte, wurde bereits in den 1980er Jahren politisch gefordert bzw. von den wissenschaftlichen Visionären der damaligen Zeit angegangen. Allein deswegen war das Ausrufen der Energiewende eine überfällige Konsequenz – aber auch ein Glücksfall, weil sie uns zwingt, selbstverständlich geglaubte Dinge kritisch zu hinterfragen und neu zu bewerten.

Eine dieser Chancen ist die Umstellung der Mobilität auf sogenannte ›Grüne Kraftstoffe‹. Sie werden im Gegensatz zu den althergebrachten ›Schwarzen Kraftstoffen‹ nicht aus fossilen Rohstoffen gewonnen, sondern mit Hilfe der Erneuerbaren Energien (EE).[2] Ihre Erzeugung ist gegenwärtig zumeist noch unwirtschaftlich, aber auch hier zeichnen sich bereits Entwicklungen ab. Der Dreh- und Angelpunkt einer Grünen Kraftstoffwirtschaft ist die Verfügbarkeit von Grünem Methanol.

Dies führt uns zu einem weiteren Spannungsfeld, der politischen Fixierung auf elektrisch getriebene Autos (Electric Vehicles, EV). Die vorschnelle Verkündigung des Ziels, in Deutschland bis 2020 eine Million EV fahren zu lassen, flankiert von Beschlüssen aus europäischen Nachbarländern, ab 2022 bzw. 2025 nur noch EV neu zuzulassen, erfuhr 2016 mit dem Bekanntwerden der Manipulationen an Dieselmotoren unerwartete Schützenhilfe. Diese boten die willkommene Steilvorlage, aus der Verbrennungsmotortechnik auszusteigen – ohne dass man nachvollziehbar machen konnte, warum ein solch radikaler Systemwechsel zwingend geboten sei. Unter völliger Verkennung der eigenen Möglichkeiten wurde der Verbrennungsmotor als umweltschädlich gebrandmarkt und die Lithiumbatterie zum Heilsbringer ausgerufen, ohne sich ausreichend über die tatsächlichen Carbon-Footprints beider Antriebssysteme Gedanken gemacht zu haben.[3] In der Folge wurde das Potenzial Grüner

2 Energien sind per se nicht erneuerbar. Auch wenn dieser Begriff sachlich unkorrekt ist, hat er sich eingebürgert und wird deswegen auch in diesem Beitrag so verwendet.

3 Dirk Asendorpf u. a., »Wenn möglich, bitte wenden – Ist der Elektromotor wirklich die Lösung?«, in *DIE ZEIT,* 3.8.2017, www.zeit.de/2017/32/autoindustrie-elektroauto-dieselaffaere-kartell-audi-volkswagen-daimler-bmw/komplettansicht (17.7.2018).

Kraftstoffe kaum beachtet, und es wurde schlichtweg ignoriert, dass hinter der Forcierung der Elektromobilität in China auch sehr harte wirtschaftliche Interessen auf dem automobilen Weltmarkt stehen. Die Luftreinhaltung in den chinesischen Ballungszentren ist nur eine Facette des Ganzen, die Notwendigkeit, bei automobilen Neuentwicklungen Alternativen zu durchpatentierten Antriebstechniken zu entwickeln, eine andere. Vor allem aber übersieht die gegenwärtige Diskussion, dass die zur Einführung Grüner Kraftstoffe erforderliche Technologie längst verfügbar ist und hierzulande entwickelt wurde.[4] Welche Lösungen gibt es also?

Diese Lösung ist gar nicht so weit weg. Sie liegt in der Substitution von fossilen Kraftstoffen (Schwarzen Kraftstoffen). Allerdings ist eine Substitution ex cathedra zum Scheitern verurteilt, vielmehr ist die Defossilierung einer Volkswirtschaft ein kontinuierlicher, schrittweiser Prozess. In völliger Abkehr vom Batteriekonzept liegt der Schlüssel also im Speichern der elektrisch generierten Energie in einer chemischen Verbindung, hier Methanol, man spricht auch von der chemischen Energiespeicherung. Der Grund ist einfach: Die Energiedichte der chemischen Bindung ist bei weitem unerreicht. Und sie ist auch aus sich heraus niemals durch Batteriesysteme realisierbar. Umsetzen lässt sich eine Umstellung auf Grüne Kraftstoffe zwanglos durch eine sanfte Integration Grüner Kraftstoffe, indem sie Schwarzen Kraftstoffen zugemischt werden (Blending). Die Vorgehensweise wäre ähnlich der Praxis in den 1990er Jahren, als dem Kraftstoff 3 % Methanol beigemischt wurden (M3). Somit kann auch hier auf etablierte Verfahren zurückgegriffen werden und die Volkswirtschaft wird nicht durch neue Infrastrukturmaßnahmen belastet.

Sektorenkopplung

Eine wesentliche Anforderung, die Substitutionskonzepte zu leisten haben, ist ihre infrastrukturelle Verträglichkeit. Niemandem ist geholfen, wenn eine noch so gute Idee Milliardeninvestitionen nach sich zieht, um sie einzuführen bzw. die Konsequenzen ihrer Einführung zu kompensieren. Konsequenterweise ist ein solches Substitutionskonzept nicht ideologie- oder interessensgetrieben. Ein wesentliches Momentum für eine zwangslose Integration von

4 Martin Bertau u. a., »Methanol – der Schlüssel zur Energie- und Rohstoffwende«, in Peter Kausch u. a. (Hg.), *Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung – Die nächsten 50 Jahre,* Heidelberg 2016, S. 140–158; Ulrich-Dieter Standt und Frank Seyfried, »Methanol Fuel in Combustion Engines«, in Martin Bertau u. a. (Hg.), *Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future (Asinger's Vision Today),* Heidelberg 2014, S. 410–419.

Grünem Methanol, also dem chemischen Speicher für Erneuerbare Energien, der sich auch als Kraftstoff eignet, ist die Sektorenkopplung. Es geht hier um die Kompensierung von Nachfrageschwankungen durch komplementäre Märkte. Gegenwärtig wird dies nur durch Öl geleistet.

Eine Erdölraffinerie hat einen konstanten Ausstoß pro Tag. Das ist erforderlich, um einen störungsfreien Ablauf einer Raffinerie zu gewährleisten. Genauso wie Kraftwerke sind großtechnische Chemieanlagen nicht dazu geeignet, kurzfristig Nachfrageschwankungen durch Anpassung ihrer Produktionsmengen zu kompensieren. Aus diesem Grund werden sie über die Energieerzeugung bzw. den Verkehr ausgeglichen (Abb. 1). Der Autofahrer bemerkt beispielsweise ein kurzfristiges Überangebot an Leicht- und Mitteldestillaten daran, dass Preise an den Tankstellen sinken (wie auch umgekehrt ein Unterangebot zu Preissteigerungen führt). Methanol ist eine weitverbreitete Grundchemikalie. Mit 80 Mio t (2017)[5] ist sie nach Ammoniak (137 Mio t) die Chemikalie mit dem weltweit zweitgrößten Produktionsvolumen. Eine Vielzahl der Prozesse in der Chemischen Industrie basiert mittelbar oder unmittelbar auf Methanol.[6]

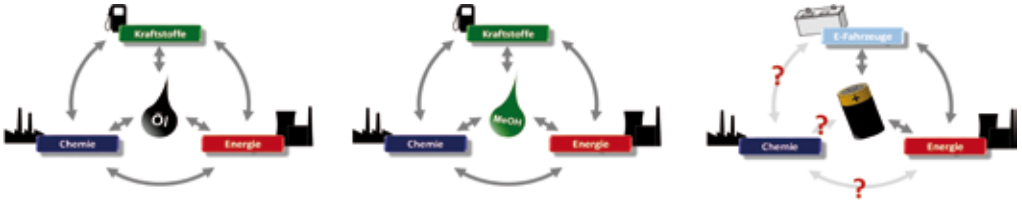

Abb 1: Sektorenkopplung. Nachfrageschwankungen in den Bereichen Chemie, Kraftstoffe und Energieerzeugung können bei Rohöl und Methanol gegenseitig ausgeglichen werden, bei einer Elektromobilität ist diese Option nicht gegeben. Quelle: Autor.

Methanol kann die Sektorenkopplung ebenfalls ermöglichen. Eine Speicherung von EE ohne chemische Energiespeicher wird allerdings fehlschlagen. In diesem Falle wäre eine Defossilierung tatsächlich einer Decarbonisierung gleichzusetzen, die Folge wäre eine Deindustrialisierung.[7]

5 www.methanol.org/the-methanol-industry (17.7.2018).

6 Heribert Offermanns, Ludolf Plass und Martin Bertau, »From Raw Materials to Methanol, Chemicals and Fuels«, in Bertau u. a., Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock (Fn. 4), S. 1–8, S. 12–18.

7 Konstantin Räuchle u. a., »Methanol for Renewable Energy Storage and Utilisation«, in *Energy Technology* 4 (2016), S. 193–200.

Die Idee, elektrische Energie in Form von chemischer Energie zu speichern, ist ebenfalls nicht neu. Als Sackgasse erweist sich indes die seit Anbeginn andauernde Festlegung auf Wasserstoff als chemischen Energieträger. Zwar besitzt er mit 121 MJ/kg tatsächlich die höchste Energiedichte, dies gilt aber für den drucklosen Zustand. Man mache sich bewusst, dass dies einem Volumen von 1 m³ entspricht. Denselben Energieinhalt besitzen auch ~3 l Superbenzin. Man erkennt leicht, dass solche Lösungen im Alltag nicht praxistauglich sind. Überhaupt werden Kraftstoffe nach ihrer volumetrischen Energiedichte beurteilt und nicht nach ihrer gravimetrischen, was auch sinnvoll ist. Jeder, der schon einmal ein Auto betankt hat, weiß, dass der Kraftstoff in Volumeneinheiten abgegeben und abgerechnet wird (Abb. 2).

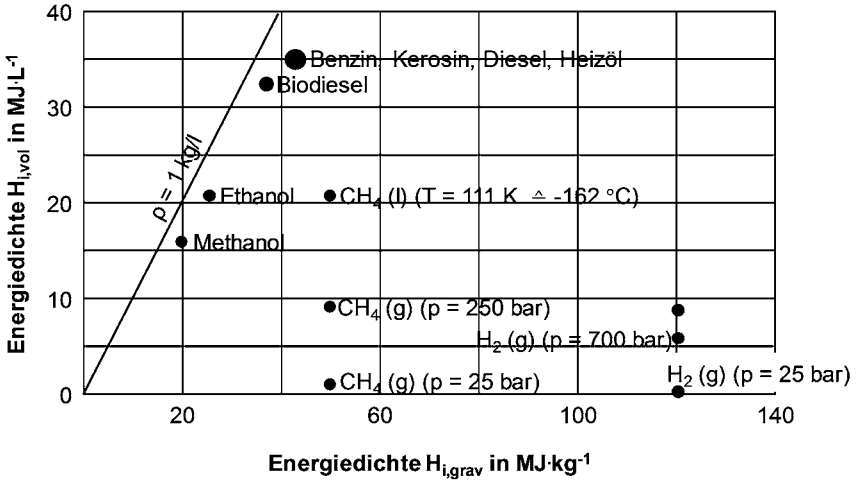

Abb 2: Volumetrische und gravimetrische Energiedichten verschiedener Energieträger.[8]

Lediglich Kryomethan (LPG) kann mit den alternativen Kraftstoffen Methanol und Ethanol konkurrieren. Jedoch ist schnell ersichtlich, dass es leicht möglich sein wird, Letztgenannte im Autotank mitzuführen, während Kryomethan erhebliche Anforderungen hinsichtlich Druckstabilität und Kälteisolierung stellt. Die Frage nach der Sinnfälligkeit, CO_2 mittels EE in Methan zu überführen, um damit Kraftfahrzeuge anzutreiben, ist damit ebenfalls beantwortet.

8 Ludolf Plass u. a., »Methanol as Hydrogen and Energy Carrier«, in Bertau u. a., Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock (Fn. 4), S. 619–655, hier S. 629.

Substitution Schwarzer Kraftstoffe: Methan oder Methanol?

Bei der Substitution Schwarzer durch Grüne Kraftstoffe muss nicht nur die Energiedichte des Produkts, sondern auch der Gesamtwirkungsgrad der Produktion, hier die CO_2-Hydrierung zu Methanol oder Methan mithilfe von EE, berücksichtigt werden. Aber auch die volkswirtschaftliche Integrationsfähigkeit im Sinne einer möglichst geringen Zusatzbelastung für beitragsleistende Bürger und Firmen und die Nutzungsvariabilität im Sinne der oben aufgezeigten Sektorenkopplung sind wesentlich. Abschließend bedarf es chemischer Entitäten, die sich einfach mit Wasserstoff be- und entladen lassen. Aus Sicht einer großtechnischen Bereitstellung von Kraftstoffen kommen hier nur Methan und Methanol infrage.

Sowohl Methan als auch Methanol werden mit Wasserstoff unter Zuhilfenahme von Katalysatoren aus CO_2 hergestellt, der Verbindung also, die auch beim Verbrennen der Kraftstoffe entsteht. Die benötigten Wasserstoffmengen werden aus der Elektrolyse von Wasser mit EE generiert. Damit ahmt eine solche Kraftstoffwirtschaft das Prinzip der Natur nach, nur dass dort typischerweise Glucose erzeugt wird. Das aus den Kraftstoffen emittierte CO_2 kann dann beispielsweise über Biomasse wieder eingefangen werden.

Neben der Verwertung von Abfall-Biomasse wie Grünschnitt, Laub oder landwirtschaftlichen Rückständen liefert auch die Müllverbrennung CO_2. Das Abgas kann unmittelbar an der Emissionsstelle abgefangen und in Methanol konvertiert werden. Grundsätzlich gilt, dass das CO_2, das sich in einem Schornstein befindet, bereits als atmosphärisches CO_2 einzustufen ist, denn die Abgabe an die Atmosphäre steht ja unmittelbar bevor. Das Abfangen von CO_2 aus den Schornsteinen trägt somit unmittelbar zum Erreichen der Klimaziele bei. Allein Müllverbrennungsanlagen erzeugen in Deutschland jedes Jahr ca. 10 Mio t CO_2. Das entspricht den Emissionen von ca. 3,9 Mio KFZ.[9]

Neben der bereits erwähnten Energiedichte erweist sich für Methan auch der Gesamtwirkungsgrad als problematisch. In einer Studie des Instituts für Technische Chemie der Technischen Universität (TU) Bergakademie Freiberg und der Air Liquide Global E&C Solutions GmbH (ehemals Lurgi AG) in Frankfurt a. M. wurden auf Basis der realen Betriebserfahrung auf den von der Lurgi errichteten Anlagen die tatsächlichen Wirkungsgrade ermittelt. Er liegt für Methanol bei 49 % und für Methan bei 41 %. Addiert sich noch die Rück-

9 Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (Hg.), *Abfallverbrennung ist kein Gegner der Abfallvermeidung,* o. O. 2008, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3285.pdf (17.7.2018).

verstromung im Blockheizkraftwerk (BHKW), liegt er bei 44 % gegenüber 33 %. Noch gravierender wird der Unterschied, wenn Grünes Methan zu Methanol reformiert wird, um als Chemierohstoff bzw. Kraftstoff eingesetzt zu werden. Dann sinkt der Gesamtwirkungsgrad für Methan auf 22 % ab, der Hälfte also des Wertes für Methanol. Dieser Vergleich ist deswegen wichtig, weil ein großer Teil des importierten Erdgases ohnehin zu Methanol reformiert wird, um in der Chemieindustrie verwendet werden zu können. Dann ist der Umweg über Methan schwerlich zu vertreten.[10]

Wie steht es um die Produktionskosten? Legt man der Methanolproduktion einen Vollastbestrieb bei 8.000 h/a zugrunde und für die Wasserstofferzeugung einen 10 MW-Elektrolyseur mit Polymerelektrolytmembran (PEMEL) bei einem Lastfaktor von 200 %, so ist die CO_2-Hydrierung zu Methanol ab einem Strompreis von 5,6 ct/kWh wirtschaftlich. Das entspricht einem Methanolpreis von 419 €/t (Stand 17.7.2018). Für die Leistungsaufnahme wurden 5 kWh/Nm³ veranschlagt. Die thermodynamische Zersetzungsleistung für Wasser liegt bei 3,86 kWh/Nm³. Addiert man noch Überspannungsverluste an den Elektroden hinzu, die Faustregel entspricht 10 % der theoretischen Zersetzungsspannung, sowie Leitungs- und Wandlungsverluste, liegt die in der Praxis erreichbare untere Grenze für die Leistungsaufnahme bei 4,5 kWh/Nm³. In der Literatur gelegentlich zu findende Zielvorgaben im Bereich von 2 kWh/Nm³ ignorieren die tatsächlichen Gegebenheiten. Eine Wasserspaltung bei in nicht ausreichendem Maße zugeführter Energie wird ergebnislos bleiben.

Methanol als Kraftstoff, Chemie- und Energierohstoff – Erfolgschancen der Energiewende mithilfe der Methanolwirtschaft

Aus EE und CO_2 lässt sich auf einfache Weise Methanol herstellen. Als Vorteil erweist sich, dass auf etablierte Anlagentechnik zurückgegriffen werden kann und die Methanolchemie eine Vielzahl von Schnittstellen zur klassischen petrochemischen Produktion von Kraftstoffen und Basischemikalien aufweist. Damit lässt sich die Substitution konventioneller petrochemischer Prozesse durch Methanol leicht realisieren. Der erste Schritt auf dem Weg zu einer sanften Substitution besteht demnach im Umschalten bestehender methanolbasierter Herstellprozesse von Schwarzem Methanol auf Grünen Methanol. Mehr noch, wenn die Stromerzeugung zu Kosten realisiert werden kann, die unter

10 Plass u. a., Methanol as Hydrogen … (Fn. 8), hier S. 643.

~5 ct/kWh elektrischer Energie liegen, bringt der Grüne Methanol sogar ökonomische Vorteile gegenüber einer Verwendung von konventionellem Methanol, wie er aus Erdgas erzeugt wird. Dieses Ergebnis beinhaltet eine ganz wichtige Botschaft: Die Energiewende kann tatsächlich ökonomisch ein Erfolgsmodell sein und auf den Weltmärkten Vorteile bringen, wenn sie denn richtig konzipiert wird. Die Methanolwirtschaft ist ein wesentlicher Baustein hierfür.[11]

Wie eingangs bereits ausgeführt, muss die Substitution fossiler Rohstoffe wirtschaftlich verträglich sein. Für die Chemiewirtschaft heißt dies insbesondere, dass Produkte auf Basis von Methanol nicht teurer sein dürfen als klassische auf fossilen Rohstoffen basierte. Naturgemäß wird man eine schnelle Umstellung nicht erwarten können. Das hat damit zu tun, dass es langfristige Lieferverträge gibt, die berücksichtigt werden müssen, zugleich stehen die Produktions- und Speicherkapazitäten für CO_2 und H_2 bzw. die Produktions- und Lagerkapazitäten für Methanol noch gar nicht zur Verfügung, um in nennenswertem Umfang agieren zu können. Dabei ist es in einer ersten Ausbaustufe noch nicht einmal notwendig, Methanolsyntheseanlagen neu zu bauen. Für ca. 7 % der Baukosten kann ein Vorreaktor in einen klassischen Synthesegaskonverter integriert werden, wie er beispielsweise an Raffineriestandorten vorhanden ist.[12] Dort findet dann die Vorreduktion des CO_2 zum CO statt, das dann in bewährter Weise zusammen mit H_2 (Synthesegas) zu Methanol reagiert. Eingesetzt werden können weiterhin alle Rohstoffe, die auch bisher schon verwendet werden. Perspektivisch indes wird man nicht umhinkommen, Anlagen für die Methanolproduktion sowie für die Methanolfolgechemie umzurüsten bzw. neu zu errichten. Letzteres wird vor allem dort der Fall sein, wo EE in großen Mengen erzeugt werden, i. e. in den Windparks im Norden sowie den Photovoltaik-Kraftwerken im Süden Deutschlands. Auch ist eine CO_2-Infrastruktur vorzusehen, die aber durch eine Kopplung an BHKW, die ›grünes‹ CO_2 generieren, durchaus auch auf kurze Distanzen ausgelegt sein kann.[13]

11 George A. Olah, Alain Goeppert und G. K. Surya Prakash, *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy,* Weinheim 2018.

12 Ludolf Plass, »Methanol als Energiespeicher der Zukunft«, 720. DECHEMA-Kolloquium, 13.2.2014.

13 Martin Bertau, »CO_2 – ein Rohstoff mit großer Zukunft«, in Peter Kausch u. a. (Hg.), *Energie und Rohstoffe, Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft,* Heidelberg 2011, S. 135–149.

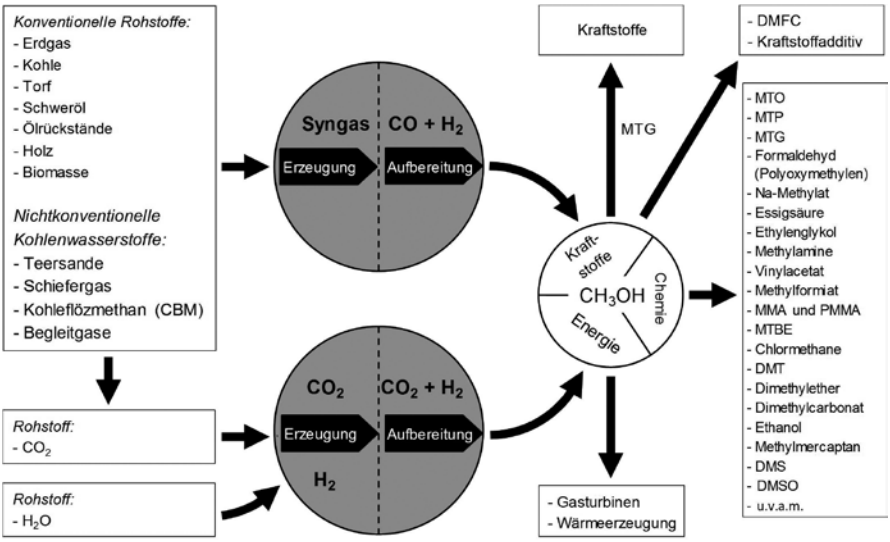

Abb 3: Rohstoffbasis für die Methanolwirtschaft. Über Synthesegas ($CO+H_2$) oder CO_2-Hydrierung kann Methanol erzeugt werden, der in den komplementären Sektoren Kraftstoff, Energie und Chemie verwendet wird. Das CO_2 kommt aus der Verbrennung unterschiedlicher kohlenstoffhaltiger Rohstoffe. Die Verbrennung hat den Vorteil, dass auch Stickstoff, Schwefel und anorganische Verbindungen, die in den Rohstoffen enthalten sind, im Sinne einer integralen Rohstoffverwertung genutzt werden können.[14]

Auf diese Weise lassen sich nicht nur fossile Rohstoffe substituieren, die Methanolwirtschaft dient auch der Schaffung und Sicherung der Rohstoffbasis für die Chemieindustrie. Gleichzeitig trägt sie dazu bei, geopolitische Unwägbarkeiten zu mindern, was insbesondere dann ökonomisch zum Tragen kommt, wenn sich aus der Einbindung der EE wirtschaftliche Vorteile für die Chemieindustrie infolge der Substitution von Erdöl und Erdgas ergeben. Auf diese Weise profitiert die Volkswirtschaft von der Energiewende. Es können klimaneutral Kraftstoffe produziert werden und das mit dem Ergebnis einer langfristigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Chemieindustrie.

Dass dieses Konzept so abwegig nicht ist, zeigt die Situation in China. Dort wurde seitens der Regierung das »Coal-to-Chemicals-Programm« aufgelegt, das auf einen strikten Übergang der erdölbasierten Rohstoffbasis auf die Methanolwirtschaft abzielt. Der Übergang zur C_1-Chemie ist in China seit ca. zehn Jahren in vollem Gange. Nachteilig für die hiesige Wirtschaft ist, dass

14 Martin Bertau, Konstantin Räuchle und Heribert Offermanns, »Methanol – die Basischemikalie«, in *Chemie in unserer Zeit* 49 (2015), S. 312–329.

die Produktionskapazität für C_1-Chemie nicht dort installiert wird, wo sie entwickelt wurde. Es ist jedoch nicht zu spät. Bei einer konsequenten Umsetzung des Energiewende-Gedankens im Sinne der skizzierten Methanolwirtschaft hat dies bei uns eine Umstellung auf EE zur Folge, was bei richtiger Anwendung zu Wettbewerbsvorteilen auf den Weltmärkten führen kann, insbesondere dann, wenn sich CO_2-Zertifikate langfristig durchsetzen, da China sein Methanol aus der Vergasung der einheimischen Kohle via Synthesegas erzeugt. Ob Maßnahmen zur Regulierung der CO_2-Emissionen kurz- bis mittelfristig greifen werden, ist angesichts der jüngsten weltpolitischen Entwicklungen sehr schwer abzusehen. Die Konsequenz, mit der China sein Programm durchzieht, lässt sich daran ablesen, dass allein Chinas Methanolbedarf den Rest der Welt zur eigenen Methanolproduktion zwingt. Auf Kraftstoffseite sind Methanol/Benzin-Blends bereits heute in vielen Provinzen verfügbar.[15] Für China hat es sich ausgezahlt. Es wurde eine massive Reduktion der Abhängigkeit von Ölimporten erreicht, und seit 2011 wächst das BIP stärker als die Rohölimporte. Dass China trotzdem noch immer der weltweit größte Ölimporteur ist, stellt dabei keinen Widerspruch dar.

In Deutschland hingegen sind die Aktivitäten noch sehr zaghaft. Am STEAG-Kraftwerk Lünen wurde von Mitsubishi Hitachi Power Systems Europe (MHPSE) eine CO_2-to-Methanol-Anlage errichtet, die 1 MW_{el} in 1 t Methanol pro Tag überführen kann. Die grundsätzliche Umsetzbarkeit wurde belegt. ThyssenKrupp arbeitet im »Carbon2Chem«-Projekt daran, Hüttengase in Ammoniak und Methanol zu überführen, sieht eine Einsatzreife aber nicht vor 2032. Das erste Projekt, das sich mit der Methanolproduktion aus Grünem CO_2 befasst, ist das »Power-to-Methanol«-Projekt, in dem ein Konsortium aus Clariant, Südzucker, ThyssenKrupp, TU Bergakademie Freiberg und der DECHEMA ab Oktober 2018 daran arbeitet, das CO_2 aus der Bioethanolanlage in Straubing mit Hilfe von photovoltaisch erzeugtem Strom in Methanol zu überführen.

Methanolbasierte Kraftstoffe

Die Herstellung und Verwendung von reinem Methanol bzw. Methanol-Kraftstoffgemischen für den Mobilitätssektor ist heute bereits in vielen Ländern alltäglich bzw. rückt zunehmend in den Fokus aktueller Studien. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist die direkte Nutzung der etablierten Transport- und Lagerungswege für konventionelle Kraftstoffe.

15 Chi-Jen Yang und Robert B. Jackson, »China's growing methanol economy and its implications for energy and the environment«, in *Energy Policy* 41 (2012), S. 878–884.

China ist derzeit das weltweit am weitesten fortgeschrittene Land in Bezug auf methanolbasierte Treibstoffe. Alle Qualitäten, M5 bis M100, sind gegenwärtig in 26 von 31 Provinzen erhältlich. Auf diese Weise ging bereits im Jahr 2010 mit 7 Mio. t knapp ein Drittel der chinesischen Methanolproduktion von 22 Mio. t in den Treibstoffsektor.[16]

In den USA wurde im Rahmen des Kalifornischen Methanol-Programms bereits ab den 1980er Jahren der methanolbasierte Kraftstoff M85 in sogenannten FFVs (Flexible Fuel Vehicles) erfolgreich getestet. Aber aufgrund des niedrigen Ölpreises sowie durch die Einführung des E10-Kraftstoffes wurde 2005 nach 25 Jahren und 200 Mio. Testmeilen die Verwendung von M85 eingestellt. Die einzige gegenwärtige Anwendung ist der Rennsport.[16]

Deutschland, der Marktführer im Bau von großtechnischen Methanolproduktionsanlagen, besitzt momentan keine Anwendung von methanolhaltigen Kraftstoffen. Volkswagen führte aber bereits in den 1980er Jahren Flottenversuche mit derartigen Kraftstoffen durch. Auch der M3-Kraftstoff war in den 1990er Jahren im Tankstellennetz verfügbar.[17]

Israels Tankstellennetz kann bereits heute flächendeckend M3-Kraftstoff vorweisen; der Einsatz von M15 ist derzeit Gegenstand intensiver Studien, in denen bisher keine signifikanten Unterschiede zum konventionellen Benzin beobachtet werden konnten.

Andere Staaten, in denen ebenfalls Methanol-Benzin-Gemische im Alltag untersucht werden, sind z. B. Trinidad (Mathanex, MHTL), Malaysia (Petronas), Australien (Coegee Energy), Iran, Pakistan, Neuseeland und Vietnam.

Automobilkraftstoffe sind ebenfalls über die etablierte Fischer-Tropsch-Synthese sowie über die katalytische Umsetzung von Methanol (MTG) zugänglich und stellen somit eine Alternative zu Methanol und Methanol-Kraftstoffgemischen dar. Jedoch sind für diese beiden Prozesse derzeit keine Produktionskapazitäten in Europa installiert und auch mit einer signifikanten Veränderung ist mittel- bis langfristig nicht zu rechnen.[18]

Für Dieselverbrennungsmotoren stellen Oxymethylenether (OME) in Zukunft einen vielversprechenden Ersatz als Kraftstoff bzw. als Kraftstoffadditiv dar. Aufgrund ihres hohen Sauerstoffanteils führen sie zu einer starken Herabsetzung des Ausstoßes von Ruß und Stickoxiden. Gegenwärtig erfolgt nur die großtechnische Synthese von Dimethoxymethan (OME1). Für den

16 Lesli Bromberg und Wai K. Cheng, »Methanol as an alternative transportation fuel in the US: Options for sustainable and/or energy-secure transportation«, Cambridge 2010, www.afdc.energy.gov/pdfs/mit_methanol_white_paper.pdf (17.7.2018).

17 Vgl. Standt und Seyfried, Methanol Fuel … (Fn. 4).

18 Vgl. Fn. 8.

Dieselkraftstoffersatz sind aber Oligomere mit einer Kettenlänge von n = 3-5 zu bevorzugen, da sie analoge chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen. Sie sind damit ohne aufwendige Modifikationen direkt einsetzbar. Die technischen Hürden hierbei sind vor allem die selektive Synthese der favorisierten Kettenlängen sowie eine entsprechende Reinheit. Die Synthese im Labormaßstab basiert auf Formaldehyd. Für einen wirtschaftlichen und großtechnischen Prozess zur Herstellung von OME sind jedoch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, die aktuell überwiegend in China stattfinden.[19]

Rohstoffsituation – wie realistisch ist die E-Mobilität?

Lithium, Synonym für die Energiewende, hat sich binnen weniger Jahre zu einem strategischen Rohstoff entwickelt.[20] Es gilt in den wichtigsten Anwendungsgebieten, der Speicherung von Energie in Elektrofahrzeugen und mobilen Elektrogeräten, in der Glas-, Emaille- und Keramikindustrie, als Schmiermittel, in pharmazeutischen Produkten sowie der Aluminiumherstellung, als unersetzbar. Diese Marktentwicklung ist für die Lithiumversorgung insofern problematisch, als all diese Marktsegmente Wachstumsmärkte sind, die um dieselben Rohstoffquellen konkurrieren. Aus diesem Grund wird in den kommenden Jahren mit einem kontinuierlichen Anstieg der Lithiumnachfrage von 8–11 % pro Jahr gerechnet. Szenarien gehen sogar davon aus, dass es bereits im Jahr 2025 zu einem Versorgungsengpass kommen kann. Mit 46 % Gesamtanteil ist Lithiumcarbonat, Li_2CO_3, aus dem alle anderen Lithiumverbindungen erzeugt werden können, das wichtigste Lithiumderivat. Der Preisschub von 5.500 USD/t Li_2CO_3 im Oktober 2015 auf ~14.000 USD/t Li_2CO_3 (+254 %) im August 2017 belegt die Bedeutung dieses Leichtmetalls (Abb. 4).

19 Jakob Burger u. a., »Poly(oxymethylene)dimethyl ethers as components of tailored diesel fuel: Properties, synthesis and purification concepts«, in *Fuel* 89 (2015), S. 3315–3319; Ludger P. Lautenschütz, »Neue Erkenntnisse in der Syntheseoptimierung oligomerer Oxymethylendimethylether aus Dimethoxymethan und Trioxan«, Dissertation, Heidelberg 2010.

20 European Commission, *Report on Critical Raw Material for the EU – Non-Critical Raw Materials Profiles,* o. O. 2014, ec.europa.eu/DocsRoom/documents/7422/attachments/1/translations/en/renditions/pdf (17.7.2018).

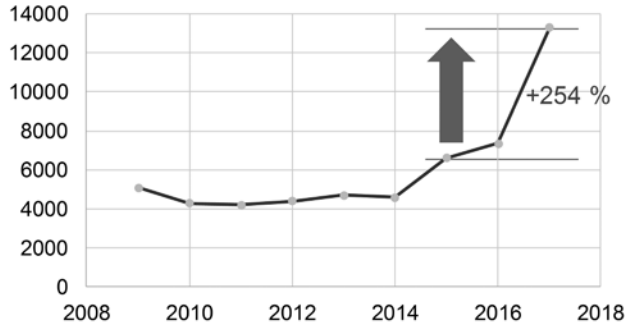

Abb 4: Preisentwicklung für Lithiumcarbonate (technical grade) 2009 bis heute.
Quelle: Daten: www.metalbulletin.com (Stand 17.7.2018), Grafik: Autor.

Aufgrund der Nachfragesteigerung an Li_2CO_3 wird in Zukunft mit einem konstanten Preisanstieg gerechnet, wobei einige Prognosen sogar von einem Marktpreis von 25.500 USD/t im Jahr 2020 ausgehen.[21] Optimistische Szenarien gehen davon aus, dass im Jahr 2050 nur 25 % der Lithiumnachfrage durch Sekundärlithium abgedeckt werden kann. Diese Zahl klingt auf ersten Blick ernüchternd, ist aber dem Umstand geschuldet, dass lediglich das Akkumulatorenlithium überhaupt recycelbar ist. In allen anderen Anwendungen dissipiert das Lithium. Bei einem Marktanteil von 39 % für Lithium-Akkumulatoren entsprechen 25 % Recycling einer Rückgewinnungsrate von immerhin 64 %. Allerdings zielen bisherige Recyclingverfahren weit überwiegend nur auf die Rückgewinnung der wertvolleren Kathodenmaterialien Kobalt und Nickel. Sekundäre Lithiumquellen haben bislang noch keine signifikante Bedeutung.[22] Einen Ausweg können heimische Lagerstätten bieten. Für das heimische Lithiumvorkommen im sächsischen Zinnwald (Erzgebirge) existiert zwar in Form des COOL-Verfahrens (CO_2-*L*augung) eine kommerziell verfügbare Technologie,[23] ein Abbau des Vorkommens durch die Deutsche Lithium GmbH

21 Gunther Martin u. a., »Lithium Market Research – Global Supply, Future Demand and Price Development«, in *Energy Storage Materials* 6 (2017), S. 171–179; Camille Grosjean u. a., »Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry«, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), S. 1735–1744; Martin Bertau u. a., »Wertmetalle – Gewinnungsverfahren, aktuelle Trends und Recyclingstrategien«, in *Angewandte Chemie* 129 (2017), S. 2586–2624.

22 Gerhard Angerer u. a., »Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage«, in *Innovationspotenziale* (ISI-Schriftenreihe), Stuttgart 2009.

23 Gunther Martin u. a., »Lithium extraction from the mineral zinnwaldite. Part II:

ist indes noch in Planung.[24] Da sich das Verfahren auch zum Recycling der Lithiumionen-Batterien eignet, ist von erheblichen Synergien bei der Nutzung heimischer Rohstoffe auszugehen.

Festzuhalten aber bleibt, dass das eigentlich kritische Metall für die Herstellung von Lithium-Akkumulatoren Kobalt ist. Bei gleichbleibender Nachfrage gehen einige Szenarien davon aus, dass die verfügbaren Kobaltvorkommen im Jahr 2050 erschöpft sein werden. In einem Wort: Die Rohstoffe, die wir benötigen, um 1 Mio Elektroautos auf die Straße zu bringen, stehen überhaupt gar nicht zur Verfügung – ein Beispiel für die eingangs skizzierte Schlagwortpolitik. Lithium-Akkumulatoren wird dennoch die Zukunft gehören, vor allem in kabellosen Anwendungen. Die Entwicklung der Elektromobilität wird sich jedoch abseits der Batterietechnik bewegen. Hintergrund ist die Brennstoffzellentechnik in Form der Methanol-Brennstoffzellen, die ebenfalls mit Grünem Methanol betrieben werden können.

Gibt es ein Nebeneinander von V-Mobilität und E-Mobilität?

Nicht erst seit der Energiewende wird der Elektroantrieb als Alternative zum Verbrennungsmotor diskutiert. Die Niederlande und Norwegen gehen sogar noch einen Schritt weiter und planen, ab 2025 keine Neu-PKW mit Verbrennungsmotoren mehr zuzulassen.[25] Bevor aber weitreichende Maßnahmen beschlossen werden, kommen die Entscheidungsträger nicht umhin, sich verschiedenen Fragen zu widmen, von deren Beantwortung es abhängt, wie sich EV in die Mobilitätslandschaft einordnen lassen werden.

Diese Frage muss ideologiefrei beantwortet werden, unter bewusster Offenhaltung, ob es ein Nebeneinander von V- und E-Mobilität geben kann.

Lithium carbonate recovery by direct carbonation of sintered zinnwaldite concentrate«, in *Minerals Engineering* 110 (2017), S. 75–81; Martin Bertau, Gunther Martin und Carsten Pätzold, »Verfahren zur CO_2-Behandlung von getemperten lithiumhaltigen Mineralien zur Herstellung von Lithiumcarbonat«, Deutsche Patentanmeldung DE10 2015221759.0, 2015; Dies., »Verfahren zur Gewinnung von Lithiumcarbonat aus lithiumhaltigen Batterierückständen mittels CO_2-Behandlung«, Deutsche Patentanmeldung DE102016208407.0, 2016.

24 Das Verfahren, mit dem das dort geförderte Lithium gewonnen werden soll, ist nicht publiziert.

25 Thomas Imhof, »Energiewende Mobil: Diese Länder planen die Abschaffung des Verbrennungsmotors«, in *Welt digital,* 21.4.2016, www.welt.de/motor/modelle/article154606460/Diese-Laender-planen-die-Abschaffung-des-Verbrennungsmotors.html (17.7.2018).

Methanol als Energieträger bietet sich hier geradezu an, da er beide Systeme versorgen kann.

Nicht zuletzt sind Lösungen gefragt, die von Kunden auch angenommen werden. Dazu bedarf es Preisgestaltungen, die die Zahlungskräftigkeit der breiten Masse widerspiegeln. Als einer der Dreh- und Angelpunkte wird sich die Reichweite erweisen. Lithium-Akkumulatoren besitzen ca. $^{1}/_{80}$ der Energiedichte klassischer Verbrennungskraftstoffe. Ein gewichtiges Manko der Lithium-Akkumulatorentechnik ist, dass das für die Elektroden benötigte Lithium genauso auch wie das Kobalt den Märkten auf absehbare Zeit nicht in der geforderten Menge zur Verfügung stehen wird.[26]

Es darf in diesem Zusammenhang deswegen laut darüber nachgedacht werden, ob eine methanolbasierte Kraftstoffversorgung über EE den umwelt- und klimaschutzpolitischen Zielen nicht genauso nahekommt. Nur, dass keine Eingriffe in die Umwelt vonnöten sind, um zusätzliches Lithium zu fördern, sondern auf existierende Technologien zurückgegriffen werden kann. China macht es vor.

Zusammenfassung

Methanol besitzt eine Schlüsselfunktion für eine Energie- und Rohstoffwende basierend auf Erneuerbaren Energien. Die Mehrzahl der hierfür benötigten Technologien ist bereits vorhanden. Aber Europa und auch die USA haben es bisher verpasst, das Potenzial von Methanol zu nutzen. China gewinnt dabei in mehrfacher Hinsicht: Perspektivisch weitgehende Unabhängigkeit von den Ölmärkten, umweltverträgliche Energieerzeugung über erneuerbare Energie, Kostenvorteile auf den Weltmärkten bei der Vermarktung eigener Produkte, Erhöhung des Exportüberschusses durch den Einsatz heimischer Rohstoffe usw. Und die Entwicklung verläuft rasant. Im Mobilitätssektor werden kurz- bis mittelfristig Methanol-Kraftstoffgemische die konventionellen rohölbasierten Treibstoffe zunehmend ersetzen, bis sie in Zukunft vollständig durch Methanol bzw. dessen Folgeprodukte substituiert sind. Jedoch ist aktuell in Europa und den USA keine MTG-Produktionskapazität installiert, obwohl eine Wirtschaftlichkeit dieses Prozesses gegeben ist. Desweiteren ist auch die forcierte Elektromobilität fußend auf Lithium-Akkumulatoren kritisch zu diskutieren. Methanol als Basis des Mobilitätssektors lässt sich bereits heute zwanglos in die bestehende Infrastruktur integrieren (Abb. 5).

26 Jean-Sebastien Lavallée, »Lithium: A Critical Element«, in *Machine Control Magazine* 3 (2013), S. 1.

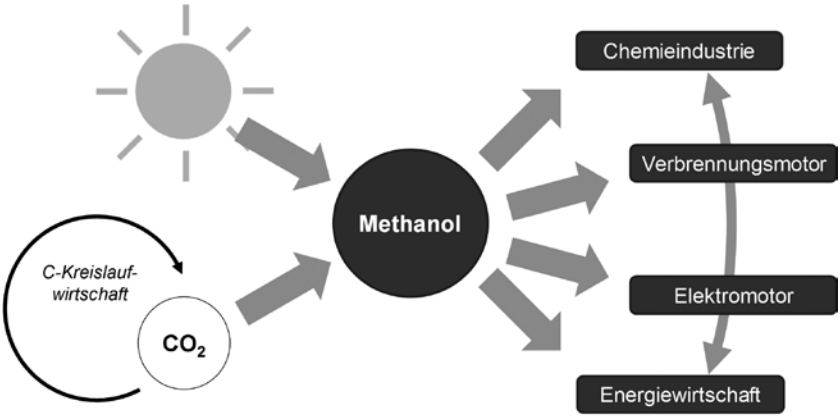

Abb. 5. Vier Anwendungen – ein Rohstoff. Quelle: Autor.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

1. Methanol ist ein Schlüssel zur Energie- und Rohstoffwende.
2. Die benötigte Technologie ist mehrheitlich state-of-the-art.
3. Europa und die USA haben das Potenzial von Methanol nicht rechtzeitig erkannt, China ist mit Abstand führend.
4. Synthetische Kraftstoffe sind mittelfristig nicht verfügbar.
5. Auf kurze bis mittlere Frist werden Methanol/Kraftstoff-Blends zum Einsatz kommen, langfristig wird es ein Nebeneinander von V- und E-Mobilität geben.
6. Die Lithiumionen-Batterie leidet unter einer kritischen Rohstoffverfügbarkeit.
7. Die Methanol-Brennstoffzelle kann anders als die Wasserstoff-Brennstoffzelle die Nachteile der Lithiumionen-Batterie kompensieren und so die Mobilität auf langen Strecken und im ländlichen Raum sicherstellen.
8. Methanol ist Basis für die Mobilität der Zukunft.[27]

27 Danksagung: Dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (FKZ 03ET7063) sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (FKZ 03WKP18A) und dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE, FKZ 100240621) danke ich für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeiten. Dr. Ludolf Plass (ehem. Lurgi AG) und Hans-Jürgen Wernicke (ehem. Südchemie AG) danke ich herzlich für die sehr gute Zusammenarbeit und die Weiterentwicklung dieses Themas. Prof. Dr. Heribert Offermanns (ehem. Degussa AG) für zahlreiche Anregungen und Impulse sowie Prof. Dr. Friedrich Schmidt (Clariant AG) und Prof. Dr. Antonio Hurtado (TU Dresden) für zahlreiche Diskussionen. Prof. Dr. Edgar Harzfeld (FH Stralsund), Marius Stöckmann (EURA AG, Zella-Mehlis) und Matthias Linicus (AirLiquide C+E Europe GmbH) danke ich für Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit der Methan- und Methanolsynthese. Dr. Carsten Pätzold, Dr. Doreen Kaiser, Michael Kraft, Luise Beckmann und Quirina Roode-Gutzmer Stöckmann (Institut für Technische Chemie, TU Bergakademie Freiberg) danke ich für zahlreiche wertvolle Diskussionen und experimentelle Arbeiten.