

Robert Schlögl

## MOBILITÄT CO<sub>2</sub> NEUTRAL?

Die Anstrengungen zum Klimaschutz werden kontinuierlich bezüglich ihrer Ziele verschärft. Diese sind jedoch nach Sektoren aufgeteilt und ermöglichen dadurch eine unerwünschte Verschiebung von Einsparlasten zwischen den Sektoren. Wirklich nützlich sind jedoch nur systemweite Einsparungen. Deutschland hat in der Entwicklung einer nachhaltigen Mobilität eine besondere Rolle, da es nicht nur einen Binnenmarkt bedient, sondern als globale Exportnation die Entwicklung in vielen Ländern mitprägt<sup>[1]</sup>. Besonders aufmerksam wird dabei nicht nur die technologische Entwicklung, sondern auch der Umbau des Mobilitätswesens insgesamt beachtet. Dazu zählen nicht nur Antriebstechnologien für Fahrzeuge, sondern auch deren Produktionstechnologien, die Bereitstellung der Energie sowie das Nutzungsverhalten<sup>[2]</sup>.

Deutschland setzt in seiner Mobilitätswende ganz auf die Technologie der Elektromobilität durch Batteriefahrzeuge (BEV) und eventuell Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff als Energieträger. Aus Gründen der allgemeinen Verständlichkeit wird hier der Begriff „Batterie“ statt des korrekten Begriffes „Akkumulator“ verwendet. Ihr Nutzen für die CO<sub>2</sub> Minderung wird durch regulatorische Maßnahmen definiert und nicht nach der tatsächlichen<sup>[3]</sup> systemweiten CO<sub>2</sub> Minderung. Andere große CO<sub>2</sub> Emittenten wie China haben sich dagegen für eine technologieoffene Strategie entschieden, bei der alle Antriebsformen mit ihren tatsächlichen Emissionsfaktoren in einem Punktesystem miteinander konkurrieren. Auf diese Weise wird vermutlich schneller eine wirksame reale Einsparung hin zu minimalen Kosten erreicht werden als im deutschen und europäischen System starrer idealisierter Flottengrenzwerte.

Die Umsetzung wird hierzulande mit dem staatlich vorangetriebenen Einsatz von elektrischer Antriebsenergie vorgebracht. Welche Anstrengungen dafür erforderlich sind und welche Folgen im System sich daraus ergeben soll kurz untersucht werden. Dabei wird lediglich vergrößert bilanziell vorgegangen, wobei Nutzungsänderungen, Verbraucherverhalten und viele Energieverluste nicht im Einzelnen betrachtet werden können. Sehr viel detailliertere Studien finden sich in der Literatur<sup>[3-4]</sup>. Ein Mengengerüst des deutschen Energiesystems ist in Tabelle 1 angegeben zusammen mit den CO<sub>2</sub> Emissionswerten.

Deutschland gewinnt mit etwa 220 TWh derzeit knapp 10% seines Endenergiebedarfes aus erneuerbaren Quellen. Extra-

**Tabelle 1: Das deutsche Energiesystem (2018). Daten aus „Zahlen und Fakten Energiedaten“ (BMWI 03/2020)**

	Energie (TWh)	CO <sub>2</sub> Emission (Mt)	Intensität
Total (Endenergie)	2492	704	0,28
Industrie (inkl. Strom)	1085	467	0,43
Verkehr (Straße)	642	126	0,19
Haushalte	645	83	0,13
Flug/Schiff	160*	36	

\* Geschätzt aus erfassten 127 TWh für den Flugverkehr und einem Anteil für den Schiffsverkehr

poliert man die bisherige sehr bemerkenswerte Wachstumskurve bis 2030 und unterstellt man, dass es keinerlei Hindernisse im weiteren Wachstum geben würde, so wären es dann mit ca. 400 TWh etwa 16% seines Energiebedarfes, wenn man eine stabile Entwicklung wie in den vergangenen 25 Jahren annimmt. Aus der Tabelle folgt weiter, dass die Mobilität im Verhältnis zu ihrem Energieverbrauch eine geringere Emissionsintensität aufweist als etwa der Industriebereich. Folgerichtig hat man sich in der Energiewende zunächst auf diesen Bereich konzentriert.

Nun rückt die Mobilität mit dem Konzept ihrer Elektrifizierung in den Fokus der Energiewende. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Defossilisierung des Systems nur dann gelingen kann, wenn die Sektoren nicht gegeneinander arbeiten, sondern immer eine systemisch optimale Lösung<sup>[5]</sup> gefunden wird. Für die Mobilität bedeutet dies, dass nicht eine „tank-to-wheel“ Betrachtung, sondern eine „well-to-wheel“ Optimierung<sup>[6]</sup> zu erfolgen hat. Damit sind die Herkunft der elektrischen Energie, ihre Bereitstellung an der Ladesäule und der Energieverbrauch für Bau und Entsorgung der Fahrzeuge zusammen mit der Quelle der Antriebsenergie zu betrachten. Die Beiträge zur CO<sub>2</sub> Emission außerhalb der Antriebsenergie sind erheblich und übersteigen diese für einige Antriebsformen<sup>[7]</sup> in der Summe.

Ein PKW verursacht während seiner angenommenen Lebensdauer von 150.000 km Fahrleistung etwa 50 Tonnen CO<sub>2</sub>. Um diese zu minimieren verfolgt die Politik zusammen mit der Industrie eine forcierte Einführung von Elektrofahrzeugen. Der enorme Effizienzgewinn von 80% gegenüber einem herkömmlichen Antriebsstrang scheint dies zu rechtfertigen. Allerdings sei angemerkt, dass dieser Gewinn nicht nur aus dem Wegfall des Verbrennungsmotors, sondern auch der mechanischen Kraftübertragung resultiert. Dieser Minderung von Emissionen im Betrieb stehen erhebliche zusätzliche Emissionen für die Herstellung der Batterie und der Leichtbaukarosserie sowie durch

Prof. Dr. Robert Schlögl  
Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion  
Stiftstr. 34-36, 45470 Mülheim an der Ruhr  
Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft  
Faradayweg 4-6, 14195 Berlin  
E-Mail: acsek@fhi-berlin.mpg.de

die zusätzlichen Belastungen des Stromsystems gegenüber. Es sei angemerkt, dass zahlreiche weitere Faktoren, wie lokale toxische Emissionen, Belastungen der Ökosysteme, Belastungen durch die Aktivitäten der Petrochemie und Ölextraktion in eine vollständige Würdigung der Folgen der Mobilität für das Energiesystem eingehen, die hier nicht betrachtet werden können.

Die folgende Betrachtung soll die Größenverhältnisse erläutern. (Alle Zahlen beziehen sich auf das Jahr 2018 und Daten aus: „Zahlen und Fakten Energiedaten“ (BMWi 03/2020)). Die CO<sub>2</sub> Emission der Straßenmobilität möge um 30% reduziert werden. Dies bedeutet eine Einsparung von jährlich 40 Mt oder von etwas über 5% CO<sub>2</sub> Emissionen in Deutschland. Dazu müssen 193 TWh an fossilem Kraftstoff ersetzt werden. Durch den Effizienzgewinn bei der Umstellung auf elektrische Antriebsenergie von 80% reduziert sich diese auf 39 TWh elektrischer erneuerbarer Energie oder 18% der erneuerbaren Energie in Deutschland. Diese deckt den Strombedarf von 680 TWh zu etwa 30%. Um keine Emissionen durch bilanziell grüne Mobilität in anderen Sektoren entstehen zu lassen, muss der Anteil der Erneuerbaren in der Mobilität soweit erhöht werden, dass das Einsparziel an CO<sub>2</sub> im Mobilitätssektor auch erreicht wird. Dafür müssen 27 TWh aus dem allgemeinen Strommix entnommen werden, der hier mit einer Belastung von 0,4 kgCO<sub>2</sub>/kWh angenommen wird. Dies führt zu einer zusätzlichen CO<sub>2</sub> Emission im Stromsektor von 11 Mt. Um diese Belastung auszugleichen und das Einsparziel von 30% zu halten, muss im Mobilitätssektor 27% mehr Antriebsenergie eingesetzt werden. Damit erhöht sich der Energieeinsatz auf 50 TWh oder 22% der verfügbaren Erneuerbaren Energie in Deutschland heute.

Dies scheint zunächst eine wohl leistbare Anstrengung zu sein. Dazu kommt, dass der Grad der CO<sub>2</sub> Einsparung noch wächst, wenn das Stromsystem weiter defossilisiert wird, wofür die Mobilität allerdings nicht verantwortlich sein kann. Allerdings sind dazu der Bau von mehr als 10 Millionen BEV Fahrzeuge, die Installation entsprechender Ladesäulen und die Übertragung und Verteilung von zusätzlichen 50 TWh im Stromsystem notwendig. All dies ist möglich, aber mit erheblichen infrastrukturellen und finanziellen Aufwendungen verbunden, die nicht nur die Nutzer der Mobilität tragen müssen. Und damit hat man dann 30% einer angestrebten totalen Defossilisierung des Straßenverkehrs erreicht. Für den Flug- und Schiffsverkehr dürfte dieser Ansatz ohnehin nicht möglich sein. Daher lohnt es sich nach Alternativen<sup>[3, 8]</sup> zu suchen.

In jedem Fall kann erwartet werden, dass Elektromobilität mit BEV eine Rolle spielen wird, zur Disposition steht ihre Exklusivität als technischer Lösungsansatz. Diese ist gegeben, falls man davon ausgeht, dass am Ende der Wende die Mobilität auf der Straße vollständig ohne CO<sub>2</sub> Emissionen auskommt. Falls man aber zulässt, dass eine diffuse Restemission, wie sie bei Flugzeugen und Schiffen unvermeidlich sein wird, auch für den Straßenverkehr zulässig ist und man annimmt, dass sie von der gleichen Dimension sein darf (siehe Tabelle 1), so ergeben sich einige weitere Optionen. Diese ergänzen die Elektromobilität vorteilhaft durch einen Mix von Antriebstechnologien und ermöglichen damit eine Anpassung an Nutzungsszenarien. Weiter können diese Optionen insgesamt den Wandlungsprozess zeitlich beschleunigen und ökonomisch entlasten.

Kern der Mobilitätswende bleibt ein elektrifizierter Antriebsstrang, vor allem für PKW. Die Energieeinsparung und die technische Vereinfachung sind unverzichtbare Vorteile dieser Technologie. Damit ist aber nicht gesagt, dass die notwendige elektrische Energie zentral erzeugt und an Bord mitgeführt werden muss. Vielmehr kann man mit dem Konzept eines seriellen hybriden Antriebsstrang eine Anzahl von Optionen zur Bereitstellung der Energie nutzen. Abbildung 1 gibt einen entsprechenden Überblick. Als stofflicher Energieträger kommen Wasserstoff aus Erneuerbaren Quellen und seine Derivate<sup>[9]</sup> zum Einsatz.

Jeder Antriebsstrang besteht danach aus dem Elektromotor und einer primären Batterie. Diese speichert die Bremsenergie und dient als Puffer für die Hauptenergieversorgung. Als BEV würde eine wesentlich größere Batterie aus dem Stromnetz unter Nutzung verfügbarer erneuerbarer Elektrizität (EE) geladen. Angedeutet ist hier, dass das Stromnetz durch stoffliche Energiespeicher stabil gehalten werden muss<sup>[10]</sup>. Eine Lösung dafür ist der Import von erneuerbarer Energie als Ammoniak<sup>[11]</sup>, der nach Spaltung zu Wasserstoff<sup>[12]</sup> in einer Turbine verstromt wird. Die direkte Nutzung von Ammoniak als Kraftstoff ist derzeit in der Entwicklung<sup>[13]</sup>. Als Hybridfahrzeug verfügt es über einen Wandler, der chemische Energie in elektrische Energie an Bord umwandelt. Eine Brennstoffzelle erreicht dies mit Wasserstoff, der direkt in einem Tank gespeichert ist oder (auch an einer Tankstelle) aus einem organischen Träger der wiederaufladbar<sup>[14]</sup> ist, gewonnen wird (LOHC). Brennstoffzellen mit einfacher zu transportierenden Brennstoffen<sup>[12, 15]</sup> befinden sich in der Entwicklung.

Synthetische Kraftstoffe<sup>[16]</sup> sind Flüssigkeiten, die durch die Umsetzung von Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen mit CO<sub>2</sub> aus unvermeidlichen Punktquellen gewonnen werden können. Es sind zahlreiche molekulare Strukturen synthetischer Kraftstoffe denkbar<sup>[17]</sup>. Sie mögen weiterhin optimierte Verbrennung- und Motoreigenschaften aufweisen. Da man jedoch unmittelbar heute die Emissionen aus der Mobilität reduzieren

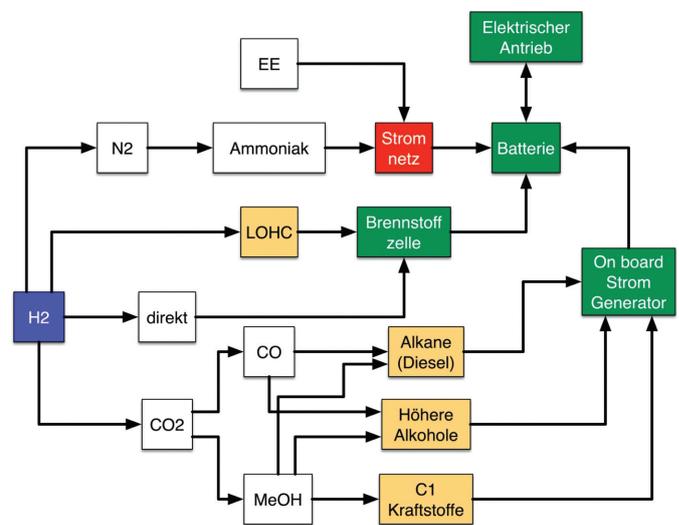


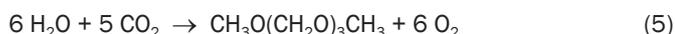
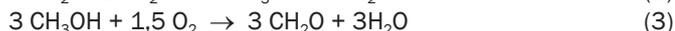
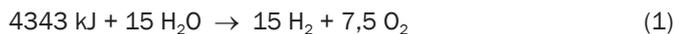
Abbildung 1: Energiequellen für die Mobilität. Alle aufgeführten stofflichen Energieträger eignen sich auch für Schiffsantriebe. Flugzeuge lassen sich nur mit Alkanen betreiben. Die Möglichkeiten der Nutzung von Biomasse wurden hier nicht mit einbezogen.

muss, werden hier nur Optionen vorgestellt die mit existierenden Verbrennungsmotoren nach geringfügigen Umrüstungen verwendet werden können. Weiterhin müssen für ihre Herstellung großtechnische Syntheseverfahren bekannt sein.

Für die Nutzung von CO<sub>2</sub> existieren leistungsfähige katalytische Prozesse<sup>[18]</sup>, die entweder Methanol oder Kohlenmonoxid als erste Produkte liefern. Methanol kann als Kraftstoff<sup>[19]</sup> verwandt werden, hat aber keine optimalen Eigenschaften<sup>[20]</sup> dafür. Daher wird die Synthese von Alkangemischen, die chemisch den heutigen fossilen Kraftstoffen sehr ähnlich sind, und unmittelbar statt fossiler Kraftstoffe einsetzbar sind, mittels der Fischer-Tropsch Synthese als die geeignete Lösung gesehen<sup>[21]</sup>. Ein Nachteil dieser zunächst attraktiven und heute großtechnisch verfügbaren Lösung<sup>[22]</sup> ist eine weiterhin nicht optimale Verbrennung des Kraftstoffes mit den Folgen einer komplexen Abgasnachbehandlung zur Vermeidung toxischer lokaler Emissionen.

Nutzt man Methanol als Ausgangsstoff so lassen sich durch Kondensation ebenso Alkangemische erzeugen (MTG Prozess). Attraktiv ist weiter die Herstellung von C1 Kraftstoffen<sup>[23]</sup>. Diese verbrennen praktisch emissionsfrei<sup>[24]</sup> und weisen günstige physikochemische Eigenschaften auf und sind nicht toxisch. Zu nennen sind hier vor allem Dimethylether<sup>[25]</sup> (DME), Oxymethylenether<sup>[21a, 26]</sup> (OME) Methylformiat (MF) und Dimethylcarbonat (DMC). Ein chemischer Grund für ihre Emissionsarmut bei der Verbrennung liegt in der molekularen Struktur. Sie weist ein Gerüst aus alternierenden C und O Atomen und nicht aus nur C Atomen auf. Damit entfallen Elementarschritte, die zur Bildung von Ruß führen<sup>[24, 27]</sup>. Man gewinnt die Freiheit, die Motorsteuerung auf minimale NO<sub>x</sub> Emission zu optimieren<sup>[28]</sup> (und man vermeidet technisch bedingte Abschaltvorrichtungen der Abgasreinigung). Der Preis dafür ist eine deutlich reduzierte Energiedichte (etwa 21 MJ/l im Vergleich zu 35,6 MJ/l für Diesel). Eine deutlich höhere Stoffdichte (1,03 Kg/l für OME<sub>n</sub> im Vergleich zu 0,835 Kg/l für Diesel) und eine etwas bessere Energieausbeute durch vollständige Verbrennung reduzieren den Volumeneinsatz auf das 1,7 fache von Diesel.

Die folgenden Bruttoreaktionsgleichungen zeigen den Syntheseweg für OME über Wasser Spaltung (1), CO<sub>2</sub> Reduktion zu Methanol (2), Dehydrogenierung von Methanol (3) und schließlich kontrollierter Oligomerisation (4,5).



64% der Energie bleiben im Kraftstoffmolekül erhalten wobei Verluste durch die freiwerdenden Reaktionsenthalpien der Zwischenprodukte unberücksichtigt bleiben, da man von einer effektiven Wärmeintegration ausgeht. Gleichwohl treten sicherlich weitere Verluste auf, so dass man bei optimal entwickelten Verfahren von etwa 40% netto Energiespeicherung ausgehen kann. Die dann verfügbaren 2170 kJ/Mol können mit maximal

50% Effizienz in einem optimal entwickelten „Motor“ in elektrische Energie gewandelt werden und stehen damit mit ca. 1080 kJ/Mol als elektrische Traktionsenergie zur Verfügung. Somit wurden von der primären elektrischen Energie für die Wasserspaltung 75% im Prozess verloren. Diese Zahl ist typisch, man rechnet für synthetische Kraftstoffe mit etwa 20% Gesamtwirkungsgrad für die Kette von Strom zu Strom.

Projiziert man diese Zahlen wieder auf das grobe Mengengerüst der obigen Abschätzung so erkennt man, dass enorme Mengen von erneuerbarer Energie erforderlich sind, um synthetische Kraftstoffe aus CO<sub>2</sub> und Wasserstoff zu gewinnen. OME<sub>3</sub> weist eine Energiedichte von 21 MJ/kg auf. Daraus ergibt sich ein Energiegehalt von 5,8 TWh/Mt OME. Da synthetische Kraftstoffe aus nicht-regenerativen CO<sub>2</sub> Punktquellen nur maximal 50% CO<sub>2</sub> Minderung bringen können<sup>[29]</sup>, muss man für diesen Fall 66 Mt OME einsetzen, um in der Mobilität 40 Mt CO<sub>2</sub> zu sparen. Um dies herzustellen benötigt man etwa 1200 TWh Energie<sup>[4]</sup>, wobei etwa 760 TWh alleine auf die Spaltung von Wasser entfallen.

Diese großen Zahlen reduzieren sich erheblich, wenn man das seriell hybride Antriebskonzept aus Abbildung 1 anwendet. Dann benötigt man nur 20% der Antriebsenergie eines konventionell-mechanischen Antriebsstranges, die man durch den Wandler mit etwa 50% Effizienz aus dem OME herstellen kann. Das reduziert die benötigte Menge auf 26 Mt OME und den Energieeinsatz auf 480 TWh. Setzt man nun CO<sub>2</sub> aus nachhaltigen Quellen ein (Biomasse), so halbieren sich die Werte nochmals, da dann synthetische Kraftstoffe keine anrechenbare CO<sub>2</sub> Emission mehr erzeugen. All dies gilt nur für optimierte Prozesse und eine Herkunft aller Prozessenergie aus erneuerbaren Quellen. Solche Synthesen sind nur mit dem massenweisen Import von solarem Wasserstoff aus energiereichen Gegenden der Erde denkbar<sup>[30]</sup>.

Eine Kompromisslösung zwischen Alkanen und den C1 Kraftstoffen für den Zielkonflikt Energiedichte gegen Sauberkeit der Verbrennung stellen die höheren Alkohole dar. Diese Familie<sup>[31]</sup> reicht von Ethanol über Butanol bis zu etwa Oktanol. Sie enthalten graduell weniger Sauerstoff und tragen damit eine höhere Energiedichte mit sich. Gleichzeitig sorgt die Alkoholgruppe für eine reduzierte Rußbildung - allerdings weniger effizient als bei den C1 Kraftstoffen. Anstatt eines molekularen Kompromisses kann man auch einen physikalischen Kompromiss<sup>[32]</sup> eingehen und synthetische Kraftstoffe mit fossilen Kraftstoffen mischen. Dies wurde eingehend am Beispiel OME untersucht. Eine neue Arbeit<sup>[28a]</sup> kommt nach ausführlichen Messungen zum Schluss, dass eine physikalische Mischung von Diesel mit OME 1, das wesentlich einfacher synthetisch zugänglich ist als höhere OME Strukturen, zu hervorragenden motorischen Werten und ausgezeichnete sauberere Verbrennung durch eine Kombination von Effekten während und nach der Verbrennung führt. Optimiert man die CO<sub>2</sub> Einsparung über ein gesamtes Energiesystem, so kommt man zu dem Schluss, dass Mischungen von Diesel und OME aus Biomasse die höchsten Einspareffekte bei den geringsten Belastungen des soziotechnischen Systems<sup>[33]</sup> ergeben. Eine weitere Untersuchung<sup>[34]</sup> weist auf zahlreiche Möglichkeiten für die technische Vereinfachung von Antriebssträngen mit Dieselmotoren bei nicht nachweisbarer Partikel-

emission hin, wenn sie mit reinem  $\text{OME}_{3-5}$  betrieben werden. Weiter werden technisch ausgereifte und ökonomisch machbare Anlagenkonzepte<sup>[35]</sup> für die Synthese dieser synthetischen Kraftstoffe beschrieben. Vorsicht ist geboten bei allen synthetischen Kraftstoffen, dass sie nicht zu Emissionen von heute nicht vorhandenen schädlichen Spurenstoffen führen. Solche Stoffe könnten Methan oder Formaldehyd sein, die dann mit maßgeschneiderten Abgasnachbehandlungssystemen entfernt werden müssen. Die allgemein berichtete effizientere Verbrennung der sauerstoffhaltigen Kraftstoffe lässt vermuten, dass die Mengen solcher Spurenstoffe gering sein sollten.

Vergleicht man die Elektromobilität mit BEV mit derjenigen über synthetische Kraftstoffe in Bezug auf den nötigen Einsatz von erneuerbarer Elektrizität alleine, so ist sehr klar, dass die BEV Technologie weit überlegen ist. Der Vorsprung schrumpft allerdings erheblich, wenn man die infrastrukturellen Folgen mit bedenkt. Synthetische Kraftstoffe erfordern weder für die Transport- und Lagerinfrastruktur inkl. Tankstellen Aufwendungen, noch erfordern sie die Nutzung gänzlich neuer Fahrzeuge. Zudem belasten sie die lokale Strominfrastruktur nicht. Weiterhin kann die Einführung synthetischer Kraftstoffe graduell erfolgen, wenn sie mit fossilen Kraftstoffen gemischt werden. Dadurch ergeben sich Geschäftsmodelle für ihre Herstellung, sofern ausreichend Mengen von günstigem Wasserstoff verfügbar sind, der größtenteils aus dem Ausland importiert werden muss.

In dieser Lage und angesichts der Tatsache, dass alle Sektoren des Energiesystems nach einer schnellen Defossilisierung verlangen und dabei nicht durch jeweils andere Sektoren belastet werden können, kann man nur ein gemischtes Vorgehen als zielführend ansehen. Der Kampf um die exklusiv beste Antriebstechnologie ist verfehlt und behindert das Fortschreiten der Mobilitätswende.

Zunächst sollte die Einführung von BEV fortgeführt werden für Nutzungsarten, wo Modelle mit minimal energieaufwändiger Produktionstechnik sinnvoll einsetzbar sind. Die Strominfrastruktur darf dabei nicht so belastet werden, dass erhebliche Ausbauminvestitionen zusätzlich zu den geplanten Maßnahmen erforderlich werden. Weiterhin sollte sich die Fahrzeugindustrie auf die Realisation von seriellen Hybriden mit optimierten Stromerzeugern und Mehrstoffbrennverfahren konzentrieren. Damit könnte eine rasche und wirksame  $\text{CO}_2$  Einsparung erzielt werden, ohne dass nicht-nachnutzbare Investitionen fällig werden.

In dieser Zeit muss Wasserstoff in erheblichen Mengen und zu günstigen Preisen (weniger als 50% des heutigen Preises für regenerativen Wasserstoff) verfügbar werden. Damit kann als Erstes die Raffinerieindustrie ihren Bedarf an Wasserstoff und an Energie defossilisieren und somit konventionelle Kraftstoffe in ihrer  $\text{CO}_2$  Emission reduzieren und sie für die Zumischung synthetischer Kraftstoffe als mittelfristige Lösung attraktiv machen. Diese müssten bis in etwa 10 Jahren in systemrelevanten Mengen hergestellt, zertifiziert und den Raffinerien verfügbar gemacht werden. Sobald sich Produktionskapazitäten für synthetische Kraftstoffe ausweiten, können Schwerlastanwendungen wie Lokomotiven, Schiffe, Baumaschinen und der LKW Transport damit versorgt werden. Die Geschwindigkeit der Ein-

führung wird wieder von der Verfügbarkeit des Wasserstoff abhängen, der für diese Anwendungen nur zu geringen Anteilen aus heimischer erneuerbarer Elektrizität stammen kann. In der Phase der breiten Verfügbarkeit von Wasserstoff kann man vor allem im LKW-Segment an die direkte Nutzung mit Brennstoffzellen herangehen. Dies sollte vor allem im Verkehr zwischen Stützpunkten sinnvoll sein, an denen man nicht-öffentliche Großtankstellen einrichten kann. Parallel dazu kann die Versorgung der Luftfahrt mit synthetischen Kraftstoffen vorangetrieben werden. Deren Herstellung wird die Zwangsproduktion von Kohlenwasserstoffen mit sich bringen, die man nicht im Flugzeug, wohl aber in Fahrzeugkraftstoffen verwerten kann.

Solch ein „Ökosystem von Antriebsarten“ ist kein schlechter Kompromiss oder gar ein Versuch zur Konservierung des „Übeltäters“ Verbrennungsmotor. Es ist vielmehr die intelligente Antwort einer Mobilitätsindustrie auf die sehr unterschiedlichen Anforderungen an ihre Produkte in enorm unterschiedlichen Energiesystemen. Flexibilität und Modularität in der Fahrzeugindustrie und eine enge Kooperation mit der Kraftstoff- und Stromindustrie sind allerdings Voraussetzungen für eine wirksame Emissionsminderung zu günstigen Kosten. Die Weiterverwendung vieler Technologien und Infrastrukturen ist zeitlich und ökonomisch effektiv. Die graduelle Einführung neuer Elemente erlaubt die Aufstellung tragfähiger Geschäftsmodelle. Voraussetzung ist allerdings eine geopolitisch diverse und leistungsfähige Versorgung mit Wasserstoff aus Gegenden der Erde, in denen großer Energieeintrag der Sonne erheblich kostengünstigere Produktionsbedingungen möglich sind als in Mitteleuropa.

Es ist das Ziel dieser Arbeit, einen ersten Eindruck von den Möglichkeiten und Dimensionen der Mobilitätswende zu vermitteln. Viele Details und komplexe Zusammenhänge mussten unberücksichtigt bleiben. Die angegebene Literatur führt hier weiter. Es sei deutlich gesagt, dass die Dimension der Herausforderung unverzügliches Handeln auf großen Skalen erfordert, wenn die Klimaschutzziele tatsächlich erreicht werden sollen. Wissenschaftliches Arbeiten dient hier zunächst der Lösung zahlreicher Probleme der systemischen Koppelung bekannter Einzelprozesse. Grundlegend neue Forschung kann nur der Vorbereitung verbesserter Prozesse für die folgenden Generationen der technischen Infrastruktur dienen. Ohne sozialwissenschaftliche Begleitung kann die Mobilitätswende an Fragen der Akzeptanz und mangelnder Bereitschaft zum stetigen Wandel scheitern.

## LITERATUR

- [1] T. Altenburg, E. W. Schamp, A. Chaudhary, *Science and Public Policy* 2016, **43**, 464-475.
- [2] B. Truffer, J. Schippl, T. Fleischer, *Technological Forecasting and Social Change* 2017, **122**, 34-48.
- [3] L. Lombardi, L. Tribioli, R. Cozzolino, G. Bella, *International Journal of Life Cycle Assessment* 2017, **22**, 1989-2006.
- [4] C. Hank, L. Lazar, F. Mantei, M. Ouda, R. J. White, T. Smolinka, A. Schaadt, C. Hebling, H. M. Henning, *Sustainable Energy & Fuels* 2019, **3**, 3219-3233.

- [5] F. Ausfelder, C. Beilmann, M. Bertau, S. Brauning, A. Heinzl, R. Hoer, W. Koch, F. Mahlendorf, A. Metzeltin, M. Peuckert, L. Plass, K. Rauchle, M. Reuter, G. Schaub, S. Schiebahn, E. Schwab, F. Schüth, D. Stolten, G. Tessmer, K. Wagemann, K. F. Ziegahn, *Chemie Ingenieur Technik* 2015, **87**, 17-89.
- [6] W. W. Ke, S. J. Zhang, X. Y. He, Y. Wu, J. M. Hao, *Applied Energy* 2017, **188**, 367-377.
- [7] R. Zellner, *Nachrichten aus der Chemie* 2019, **67**, 26-31.
- [8] R. Borup, J. Meyers, B. Pivovar, Y. S. Kim, R. Mukundan, N. Garland, D. Myers, M. Wilson, F. Garzon, D. Wood, P. Zelenay, K. More, K. Stroh, T. Zawodzinski, J. Boncella, J. E. McGrath, M. Inaba, K. Miyatake, M. Hori, K. Ota, Z. Ogumi, S. Miyata, A. Nishikata, Z. Siroma, Y. Uchimoto, K. Yasuda, K. I. Kimijima, N. Iwashita, *Chemical Reviews* 2007, **107**, 3904-3951.
- [9] aT. Sinigaglia, F. Lewiski, M. E. S. Martins, J. C. M. Siluk, *International Journal of Hydrogen Energy* 2017, **42**, 24597-24611; bA. Ahmed, A. Q. Al-Amin, A. F. Ambrose, R. Saidur, *International Journal of Hydrogen Energy* 2016, **41**, 1369-1380; cJ. M. Thomas, *Energy & Environmental Science* 2014, **7**, 19-20; dF. Dawood, M. Anda, G. M. Shafiullah, *International Journal of Hydrogen Energy* 2020, **45**, 3847-3869.
- [10] M. A. Basit, S. Dilshad, R. Badar, S. Rehman, *International Journal of Energy Research* 2020, **44**, 4132-4162.
- [11] F. Schüth, R. Palkovits, R. Schlögl, D. S. Su, *Energy & Environmental Science* 2012, **5**, 6278-6289.
- [12] R. Z. Sorensen, L. J. E. Nielsen, S. Jensen, O. Hansen, T. Johannessen, U. Quaade, C. H. Christensen, *Catalysis Communications* 2005, **6**, 229-232.
- [13] A. G. Dana, O. Elishav, A. Bardow, G. E. Shter, G. S. Grader, *Angewandte Chemie-International Edition* 2016, **55**, 8798-8805.
- [14] M. Reuss, T. Grube, M. Robinus, P. Preuster, P. Wasserscheid, D. Stolten, *Applied Energy* 2017, **200**, 290-302.
- [15] aZ. Dimitrova, F. Marechal, *Renewable Energy* 2017, **112**, 124-142; bH. S. Liu, C. J. Song, L. Zhang, J. J. Zhang, H. J. Wang, D. P. Wilkinson, *Journal of Power Sources* 2006, **155**, 95-110.
- [16] aS. H. Jensen, P. H. Larsen, M. Mogensen, *International Journal of Hydrogen Energy* 2007, **32**, 3253-3257; bM. Fasihi, D. Bogdanov, C. Breyer, *Sustainability* 2017, **9**; cE. C. D. Tan, D. Schuetzle, Y. M. Zhang, O. Hanbury, R. Schuetzle, *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2018, **9**, 305-321.
- [17] aF. Hoppe, B. Heuser, M. Thewes, F. Kremer, S. Pischinger, M. Dahmen, M. Hechinger, W. Marquardt, *International Journal of Engine Research* 2016, **17**, 16-27; bS. Pischinger, *Topics in Catalysis* 2016, **59**, 834-844; cS. Deutz, D. Bongartz, B. Heuser, A. Katelhon, L. S. Langenhorst, A. Omari, M. Walters, J. Klankermayer, W. Leitner, A. Mitsos, S. Pischinger, A. Bardow, *Energy & Environmental Science* 2018, **11**, 331-343.
- [18] Z. W. Seh, J. Kibsgaard, C. F. Dickens, I. B. Chorkendorff, J. K. Nørskov, T. F. Jaramillo, *Science* 2017, **355**, 146+.
- [19] I. M. Yusri, R. Mamat, G. Najafi, A. Razman, O. I. Awad, W. H. Azmi, W. F. W. Ishak, A. I. M. Shaiful, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2017, **77**, 169-181.
- [20] X. Zhen, Y. Wang, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015, **52**, 477-493.
- [21] aB. Niethammer, S. Wodarz, M. Betz, P. Haltenort, D. Oestreich, K. Hackbarth, U. Arnold, T. Otto, J. Sauer, *Chemie Ingenieur Technik* 2018, **90**, 99-112; bN. A. Bahari, W. N. R. W. Isahak, M. S. Masdar, Z. Yaakob, *International Journal of Energy Research* 2019, **43**, 5128-5150; cA. Galadima, O. Muraza, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2019, **115**.
- [22] W. Zhou, K. Cheng, J. Kang, C. Zhou, V. Subramanian, Q. Zhang, Y. Wang, *Chemical Society Reviews* 2019, **48**, 3193-3228.
- [23] R. G. Grim, Z. Huang, M. T. Guarnieri, J. R. Ferrell, L. Tao, J. A. Schaidle, *Energy & Environmental Science* 2020, **13**, 472-494.
- [24] S. M. Sarathy, P. Osswald, N. Hansen, K. Kohse-Höinghaus, *Progress in Energy and Combustion Science* 2014, **44**, 40-102.
- [25] A. Alvarez, A. Bansode, A. Urakawa, A. V. Bavykina, T. A. Wezen-donk, M. Makkee, J. Gascon, F. Kapteijn, *Chemical Reviews* 2017, **117**, 9804-9838.
- [26] aC. Barro, M. Parravicini, K. Boulouchos, A. Liati, *Fuel* 2018, **234**, 1414-1421; bD. Deutsch, D. Oestreich, L. Lautenschuetz, P. Haltenort, U. Arnold, J. Sauer, *Chemie Ingenieur Technik* 2017, **89**, 486-489.
- [27] W. Leitner, J. Klankermayer, S. Pischinger, H. Pitsch, K. Kohse-Höinghaus, *Angewandte Chemie-International Edition* 2017, **56**, 5412-5452.
- [28] aA. Omari, B. Heuser, S. Pischinger, C. Rudinger, *Applied Energy* 2019, **239**, 1242-1249; bM. Haertl, P. Seidenspinner, E. Jacob, G. Wachtmeister, *Fuel* 2015, **153**, 328-335.
- [29] J. C. Abanades, E. S. Rubin, M. Mazzotti, H. J. Herzog, *Energy & Environmental Science* 2017, **10**, 2491-2499.
- [30] M. Fasihi, D. Bogdanov, C. Breyer, in *10th International Renewable Energy Storage Conference, Ires 2016, Vol. 99* (Ed.: P. Droege), 2016, pp. 243-268.
- [31] aA. J. Medford, A. C. Lausche, F. Abild-Pedersen, B. Temel, N. C. Schjodt, J. K. Nørskov, F. Studt, *Topics in Catalysis* 2014, **57**, 135-142; bM. Schmitz, C. Erken, A. Ohligschläger, J. K. Schnoor, N. F. Westhues, J. Klankermayer, W. Leitner, M. A. Liauw, *Chemie Ingenieur Technik* 2018, **90**, 1476-1488.
- [32] S. E. Iannuzzi, C. Barro, K. Boulouchos, J. Burger, *Fuel* 2016, **167**, 49-59.
- [33] N. Mahbub, A. O. Oyedun, H. Zhang, A. Kumar, W. R. Poganietz, *International Journal of Life Cycle Assessment* 2019, **24**, 881-899.
- [34] D. Pelerin, K. Gaukel, M. Hartl, E. Jacob, G. Wachtmeister, *Fuel* 2020, **259**.
- [35] M. Martin, J. Redondo, I. E. Grossmann, *Acs Sustainable Chemistry & Engineering* 2020, **8**, 6496-6504.