

Yuping Wu und Rudolf Holze

GIBT ES GRÜNEN WASSERSTOFF ODER NULL-EMISSIONS-FAHRZEUGE?

Am Rande einer Bunsen-Tagung gestellt würde die erste Frage erstauntes Kopfschütteln (im wohlwollenden Fall) hervorrufen, die zweite Frage vermutlich ein recht deutliches Nein als Antwort ernten. Dabei ist in einer durchaus ernstgemeinten Zeitschrift für Maschinenbauer [1] in einem Beitrag über Stahlerzeugung mit Wasserstoff als Reduktionsmittel eine kleine Notiz eingefügt: Grüner Wasserstoff ist CO₂-neutral hergestellt, durch Elektrolyse mit elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen (Wind und Sonne). Grauer Wasserstoff ist dagegen nicht CO₂-neutral hergestellt, es handelt sich vor allem um Wasserstoff aus Erdgas und als Nebenprodukt der Erdölverarbeitung.

Zero-emission-vehicles (ZEV) waren bereits in den Achtzigern in Kalifornien Diskussionsgegenstand. Gemeint waren damit batteriebetriebene Fahrzeuge BEV. Brennstoffzellen und damit angetriebene Fahrzeuge waren allenfalls in Demonstrationsexemplaren anzutreffen. Offenbar waren und sind heute nur die Emissionen von dem im Betrieb befindlichen Fahrzeug gemeint. Auspuff (tail pipe) tauchte denn auch als vorsichtiger Versuch auf, die recht eingeschränkte Begriffsdeutung mit zero-tail-pipe-emission-vehicle etwas erträglicher zu gestalten. Damit wurde der ganz offensichtlichen Tatsache Rechnung getragen, dass die zum Laden benötigte elektrische Energie durch einen vorgelagerten Wandlungsprozess zunächst bereitgestellt werden muss. Falls es sich dabei nicht um elektrische Energie aus erneuerbaren Energiequellen handelt sind Emissionen durchaus unvermeidlich im Spiel. Und selbst die Nutzung der Windenergie ist bei ausreichend umfassender Betrachtung nicht emissionsfrei. Herstellung und Errichtung einer Windkraftanlage sind mit nicht unerheblichen CO₂-Emissionen verbunden, daran ändert auch Bestreiten nichts [2]. Der Verzicht auf verbleites Benzin und der Einbau geregelter Katalysatoren hat die früher vielseitige Mischung in den Motorabgasen etwas eingeschränkt, der Rußanteil im Abgas von Dieselmotoren, der lange Zeit die energetischen Vorteile der Nutzung von Dieselmotoren wegen der Klimawirkung von Ruß nahezu aufgehoben hat [3] ist durch

entsprechende Filtertechnik auch als lösbar oder gelöst anzusehen [4]. Aktuell sind vor allem Kohlendioxid und Stickstoffoxide von erheblichem Interesse. Wegen seiner Bedeutung für den anthropogenen Treibhauseffekt, der aus Sicht des Gärtners übrigens korrekt Gewächshauseffekt heißen müsste, wird hier CO₂ näher betrachtet. Betrachtet man Emissionen unter eben diesem Gesichtspunkt – dem potentiellen Beitrag zum Gewächshauseffekt – sind neben CO₂, insbesondere N₂O und auch Methan zu berücksichtigen [5]. Die Berechnung der CO₂-Emission eines Verbrennungsmotors auf der Grundlage der Verbrennungsreaktionsgleichung (wie unten erwähnt) ist daher nicht falsch, im Hinblick auf den Gewächshauseffekt aber unvollständig. Offenkundig macht dieser weiter greifende Ansatz die ohnehin schon komplizierten Berechnungen und Vergleiche nicht einfacher. Noch komplizierter wird die Betrachtung, wenn man neben Wirkungsgrad und CO₂-Emission je gefahrenem Kilometer weitere Emissionen und Ressourcenverbräuche sowie Abfallstoffe berücksichtigt. In sog. Ökobilanzen wird dies mitunter versucht, hier soll dieser Ansatz nicht weiter verfolgt werden. Vor allem wenn Einzeldaten aus dem Zusammenhang gerissen als Argument gebraucht werden gerät die Diskussion zur Farce: Mit dem hohen „Wasserverbrauch“ bei der Lithiumgewinnung ist möglicherweise die verdunstete Wassermenge beim Eindampfen der lithiumsalzhaltigen Sole gemeint. Die verbreiteten Zahlen verblassen beim Vergleich mit gängigen Werte des Wassereinsatzes im Gemüseanbau oder der Textilproduktion [6], von der Nachhaltigkeit ist dabei noch gar keine Rede gewesen. Bedauerlich ist allerdings, wenn im gleichen um Sachlichkeit bemühten Beitrag Angaben zum aktuellen Energieeinsatz im Verkehrssektor eine überaus erstaunlich kleine Zahl bei angekommener Nutzung von BEVs und eine ähnlich wenig glaubwürdige große Zahl bei Brennstoffzellenfahrzeugen folgt.

In einem nüchternen Aufsatz, der durch seinen Titel (in dem von Kohle- und Windmotoren die Rede ist) und sein für die LeserInnen dieses Beitrags etwas abgelegenes Publikationsorgan vermutlich die angezeigte Aufmerksamkeit nicht erreicht hat, machen Buchal *et al.* auf die vorstehende triviale Tatsache und die damit verbundene Irreführung aufmerksam [7]. Sie vergleichen zwei handelsübliche Mittelklassefahrzeuge mit Diesel- und mit batteriegespeistem Elektroantrieb im Hinblick auf die CO₂-Freisetzung bei ihrer Nutzung. Beim elektrischen Antrieb berücksichtigen sie zudem zwei Grenzfälle: Strom aus dem Quellenmix, der 2018 für die bundesdeutsche Stromerzeugung festgestellt wurde, und Strom nur aus erneuerbaren Quellen. Zudem betrachten sie zumindest im Ansatz die CO₂-Freisetzung bei der Batteriefertigung. Schließlich bedenken sie den Einsatz eines mit Methan betriebenen Gasmotors (auch Gasmaschine,

Prof. Dr. Yuping Wu¹ und Prof. Dr. Rudolf Holze^{1,2,3}

¹ State Key Laboratory of Materials-oriented Chemical Engineering, School of Energy Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, 211816, Jiangsu Province, China

² Staatliche Universität St. Petersburg, Institut für Chemie, St. Petersburg, 199034, Russische Föderation

³ Technische Universität Chemnitz, Institut für Chemie, AG Elektrochemie, D-09107 Chemnitz
E-Mail: rudolf.holze@chemie.tu-chemnitz.de

DOI:

ein modifizierter Otto-Motor, der von moderater PKW-Größe zur Versorgung eines Hauses einschließlich Abwärmenutzung bis zur Nutzung der bei der Verkokung entstehenden Gase eingesetzt wird/wurde). Die Verknüpfung zu erneuerbaren Energien stellen sie dabei durch die Methanherstellung mit elektrolytisch produziertem Wasserstoff her. Im Fazit stellen sie auf die Fahrstrecke bezogen für das Batteriefahrzeug im günstigsten Fall eine um 10 % höhere CO₂-Emission im Vergleich zum dieselangetriebenen Fahrzeug fest, im ungünstigsten Fall sind die Emissionen um 25 % höher. Damit verbunden wird auf die seit Jahren nicht sinkenden CO₂-Emissionen im Verkehrssektor hingewiesen, die Gründe hierfür sind bestens bekannt [4], allerdings sind sie so unangenehm, dass sie gerne ignoriert werden.

Knobloch *et al.* [8] kommen zu einem etwas anderen Schluss: Auch beim heutigen Strommix ist in 53 Weltregionen (eine Zuordnung und Aufteilung in dieser Studie), die 95 % des Welttransport- und -wärmebedarfs entsprechen, die CO₂-Intensität (d.h. die Emission pro gefahrenem Kilometer bei Lebensdauer des Fahrzeugs inkl. Batterie 150000 km wie bei Buchal *et al.* [7]) eines elektrisch angetriebenen Fahrzeuges BEV kleiner als die eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotors. Die Intensität ist in Ländern mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energieträger oder Kernenergie wie Island, Schweden oder der Schweiz um bis zu 70 % niedriger, in Ländern wie Estland mit einer intensiven Nutzung von Ölschiefer um 40 % höher. Der Widerspruch zum Bericht von Buchal *et al.* ist offenkundig, leider nehmen Knobloch *et al.* dem interessierten Leser die Ursachenforschung nicht ab – sie zitieren die Arbeit nicht. Hier kann diesem Manko auch nicht umfassend abgeholfen werden, der interessierte Leser wird recht schnell selbst feststellen, dass die beiden Arbeiten nur schwer vergleichbar sind. Ein schlagender Unterschied fällt aber sofort auf: Buchal *et al.* vergleichen zwei Fahrzeuge der Mittelklasse (Mercedes C 220 d und Tesla Model 3). Gewiss bleibt die Auswahl der Vergleichsobjekte den Autoren überlassen, aber bei derartigem Vorgehen wird das Ergebnis weniger überraschend. Bereits Woo *et al.* haben auf die Problematik, die sich aus der Fahrzeugauswahl ergeben kann, deutlich hingewiesen [9]. Knobloch *et al.* haben die Beschränkung ihrer Betrachtung auf ausgewählte Fahrzeuge unterlassen und so ganz offenbar (und logisch) wesentlich aussagestärkere Ergebnisse erhalten. Sie verzichten allerdings auch darauf, über den aktuellen Stand der Technik und über sicher abschätzbare Entwicklungen hinaus zu spekulieren. Brennstoffzellen tauchen bei ihnen ebensowenig wie Gasmotoren auf – ihre aktuelle Bedeutung ist selbst punktuell viel zu gering, ihre künftige Bedeutung kaum realistisch abschätzbar. Dies mag vor allem diejenigen enttäuschen, die die aktuelle Engführung auf batteriebetriebenen Fahrzeuge für problematisch, vielleicht sogar für verhängnisvoll halten. Ebenso wird auf die Berücksichtigung der Möglichkeiten und Wirkungen des Einsatzes synthetischer Kraftstoffe (Biofuels und E-Fuels) [2, 10, 11, 12] egal ob 1. [13], 2. [13], 3. [14] oder 4. Generation [15] verzichtet. Angesichts der bei allen bislang vorgestellten Verfahren großen Zahl von Verfahrensschritten dürfte der energetische Wirkungsgrad eher mäßig sein [16, 17, 18] und allenfalls bei Einbeziehung langer Transportwege der jeweiligen Energieträger erträglich werden, inwieweit CO₂-Neutralität erreicht werden kann wird hier nicht betrachtet. Unzweifelhaft ist die Akzeptanz solcher Treibstoffe beim Endverbraucher groß, für eine Übergangszeit verdienen

auch diese Konzepte Beachtung [10]. Gewiss stehen Knobloch *et al.* diesen und anderen Möglichkeiten nicht im Weg. Sie haben mit ihrer Untersuchung aber vor allem den offenkundig auf eine reichlich simple Engführung zurückzuführenden pessimistischen Fehlschluss einer vorangegangenen Arbeit korrigiert.

Diese Deutung des beobachteten Unterschieds zwischen den Schlussfolgerungen von Buchal *et al.* [7] und Knobloch *et al.* [8] wird durch umfassende und sehr detaillierte Darstellungen in [19] unterstützt. Bild 1 zeigt zunächst den Energiebedarf für den gefahrenen Kilometer.

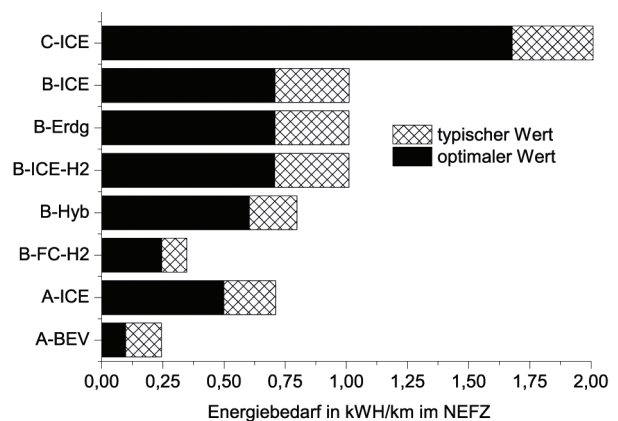


Bild 1: Energiebedarf je gefahrenem Kilometer für A: Kompaktfahrzeug, B: Mittelklassefahrzeug und C: Luxusfahrzeug, mit Antrieb durch: ICE: Verbrennungsmotor Benzin/Diesel, Erdg: Verbrennungsmotor Erdgas, ICE-H2: Verbrennungsmotor mit Wasserstoff, Hyb: Hybrid, FC-H2: Brennstoffzelle mit Wasserstoff, BEV: Batterie; NEFZ: neuer europäischer Fahrzyklus (Daten aus [19]).

Leider sind in [7] keine Angaben zu diesem Detail – Zuordnung der ausgewählten Fahrzeuge zu den Kategorien in [19] – zu finden, die Zuordnung der dort untersuchten Fahrzeuge ist also allenfalls spekulativ möglich – und unterbleibt daher hier. Betrachtet man in einem nächsten Schritt unter Annahme einer schlichten Verbrennungsreaktion und der gängigen Sprachregelung (nur die Emission am Auspuff wird betrachtet, Emissionen in Umwandlungsschritten vor dem Motor dagegen nicht) die Kohlendioxidemission von Fahrzeugen und ihren Antrieben, so erhält man Bild 2:

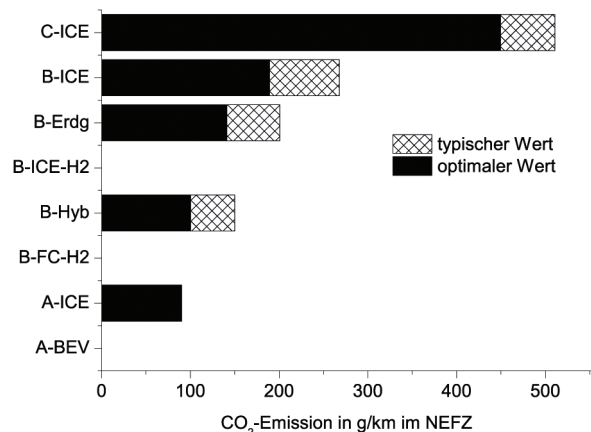


Bild 2: CO₂-Emission je gefahrenem Kilometer für A: Kompaktfahrzeug, B: Mittelklassefahrzeug und C: Luxusfahrzeug, mit Antrieb durch: ICE: Verbrennungsmotor Benzin/Diesel, Erdg: Verbrennungsmotor Erdgas, ICE-H2: Verbrennungsmotor mit Wasserstoff, Hyb: Hybrid, FC-H2: Brennstoffzelle mit Wasserstoff, BEV: Batterie, (Daten aus [19]).

Zu einem Gesamtwirkungsgrad, der die Kette vom Energieinhalt des Primärenergieträgers bis zur Fahrzeugfortbewegung umfasst, kommen die Autoren in [19] wie in Bild 3 gezeigt:

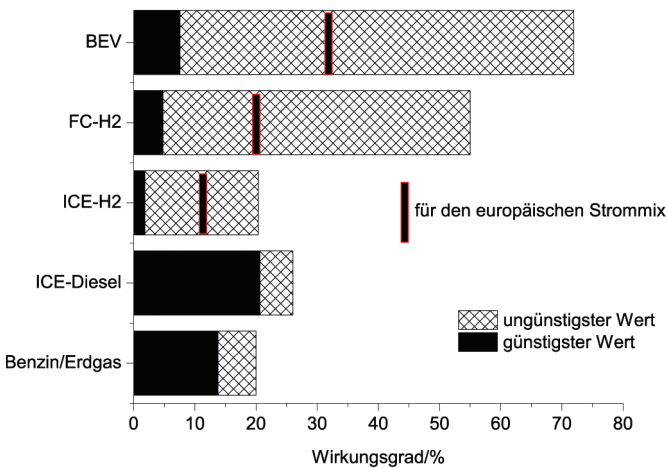


Bild 3: Wirkungsgrade für verschiedene Fahrzeugantriebe mit Antrieb durch: ICE: Verbrennungsmotor Benzin/Diesel/Erdgas/Wasserstoff, FC-H2: Brennstoffzelle mit Wasserstoff, BEV: Batterie, (Daten aus [19]).

Der niedrigste Wirkungsgrad beim BEV ergibt sich bei Nutzung elektrischer Energie aus einem Braunkohlenkraftwerk, der beste bei Nutzung von Wasserkraft. Bei Wasserstoffnutzung ergibt sich der beste Wirkungsgrad bei Nutzung der Druckreformierung von Methan und in einem Brennstoffzellenfahrzeug, der schlechteste folgt bei Betrieb eines Elektrolyseurs mit Strom aus einem Braunkohlenkraftwerk und anschließender Nutzung in einem Verbrennungsmotor. Die Angabe eines rechnerischen Wirkungsgrades für den europäischen Strommix vermittelt einen realistischeren Eindruck. Für einen hohen Wirkungsgrad ist – noch bevor man die CO₂-Emissionen betrachtet – offenbar elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen oder Wasserstoff, der mit Nutzung eben dieser Quellen produziert wird, wünschenswert. Zur eingangs gestellten Frage nach der CO₂-Emission bei der Nutzung von Fahrzeugen gelangen die Autoren in [19] schließlich in Bild 4:

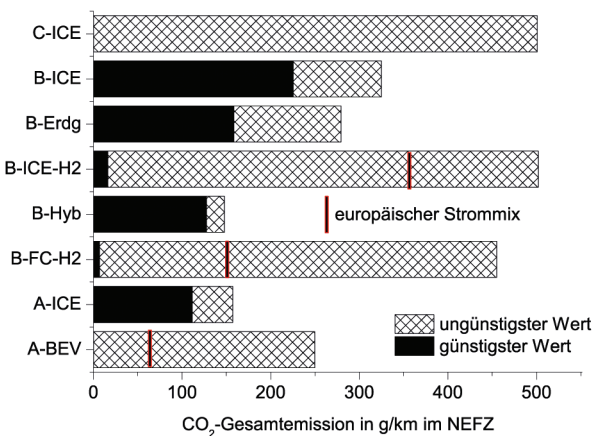


Bild 4: CO₂-Emission je gefahrenem Kilometer für A: Kompaktfahrzeug, B: Mittelklassefahrzeug und C: Luxusfahrzeug, mit Antrieb durch: ICE: Verbrennungsmotor Benzin/Diesel, Erdg: Verbrennungsmotor Erdgas, ICE-H2: Verbrennungsmotor mit Wasserstoff, Hyb: Hybrid, FC-H2: Brennstoffzelle mit Wasserstoff, BEV: Batterie, (Daten aus [19]).

Erneut fällt auf, dass elektrisch angetriebene Fahrzeuge ihren Vorteil geringerer CO₂-Emission vor allem bei Nutzung elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen bzw. von damit hergestelltem Wasserstoff zeigen. Nimmt man dagegen für ein batterieelektrisch angetriebenes Fahrzeug den ungünstigsten Fall an, so kommt man bei der CO₂-Emission zu erheblich schlechterem Ergebnis als bei einem optimalen Antrieb mit Verbrennungsmotor. Dies mag als Bestätigung der Schlussfolgerungen in [7] verstanden werden, bereits ein Blick auf den beim europäischen Strommix gefundenen Wert der CO₂-Emission erweist dies aber als Trugschluss.

Zu guter Letzt ein abschließender Blick auf die einleitenden Fragen: Die Farbe des Wasserstoffs dürfte eine Definitionssache sein und im vorliegenden Kontext allenfalls anekdotisch sein. Emissionsfreie Fahrzeuge werden nur auf der Grundlage einer ebenfalls recht willkürlichen Definition so genannt. Hier allerdings dürfte kein Humor angezeigt sein, da mit Verweis auf diese Tatsachenbehauptung unbeschadet ihrer Unsinnigkeit eine politische Debatte aufgeladen und geführt wird. Bereits jetzt – siehe das Beispiel der möglicherweise verhängnisvollen Festlegung auf BEVs – zeichnen sich beunruhigende Trends ab. Die Installation der für BEVs zweifelsohne nötigen Infrastruktur wird mit Feuereifer betrieben, Autobahnen werden versuchsweise mit elektrischen Oberleitungen ausgestattet (dass die Eisenbahn das seit Jahrzehnten kann und tut wird dabei offenbar planmäßig ignoriert), aber der Nutzung von Wasserstoff werden immer wieder Hindernisse in den Weg gelegt. Natürlich kann man mit Knobloch *et al.* bereits mit BEVs den entscheidenden Durchbruch bewiesen sehen (was die Autoren gewiss weder geschrieben noch gemeint haben), aber wesentlich größere Emissionsminderungen für praxisrelevante Fahrzeuge wie Lastkraftwagen, die realistisch mit Batterien ohnehin kaum aus einem Nischendasein herauskommen werden, sind eher mit Wasserstoff und Brennstoffzellen erreichbar.

DANKSAGUNG

Diese Anmerkungen beruhen auf zahlreichen Diskussionen während wiederholter Aufenthalte am Institut für Chemie der Staatlichen Universität St. Petersburg (Grant № 26455158), der Nanjing Tech University (Grant № 51425301), Nanjing, der Queensland University of Technology, Brisbane, und dem Indian Institute of Science, Bangalore.

LITERATUR

- [1] SCOPE, 59(1) (2020) 21
- [2] Zukünftige Kraftstoffe (W. Maus Ed.) Springer Vieweg, Berlin 2019, S. 307
- [3] E. Helmers, J. Leitão, U. Tietge, T. Butler, *Atm. Environ.* **198** (2019) 122
- [4] R. Zellner, *Nachr. Chem.* **67**(3) (2019) 26
- [5] JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, WELL-TO-WHEELS ANALYSIS OF FUTURE AUTOMOTIVE FUELS AND POWERTRAINS IN THE EUROPEAN CONTEXT, WELL-TO-TANK (WTT) REPORT – APPENDIX 2, VERSION 4a, 2014,

- https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/wtt_appendix_2_v4a.pdf (Zugriff 03.04.2020)
- [6] Der Tagesspiegel, Berlin 02.12.2019
- [7] C. Buchal, H.-D. Karl, H.-W. Sinn, *ifo Schnelldienst* **72**(8) (2019) 40
- [8] F. Knobloch, S.V. Hanssen, A. Lam, H. Pollitt, P. Salas, U. Chewpreecha, M.A.J. Huijbregts, J.-F. Mercure, *Nat. Sustain.* 2020, doi: 10.1038/s41893-020-0488-7
- [9] J. Woo, H. Choi, J. Ahn, *Transport. Res. D. Tr. E.* **51** (2017) 340
- [10] *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*, 2. Aufl. (M. Sterner, I. Stadler Hrsg.Ed.) Springer Vieweg, Berlin 2017;
Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration (M. Sterner, I. Stadler Hrsg.) Springer Vieweg, Berlin 2014
- [11] W. Leitner, J. Klankermayer, S. Pischinger, H. Pitsch, K. Kohse-Höinghaus, *Angew. Chem. Int. Ed.* **56** (2017) 5412
- [12] F. Ausfelder, K. Wagemann, *Chem. Ing. Tech.* **92** (2020) 21
- [13] A. Vetere, W. Schrader, *GIT-Labor* 64(3) (2020) 26
- [14] J.A. Ramirez, R.J. Brown, T.J. Rainey, *Energies* **8** (2015) 6765
- [15] J. Lü, C. Sheahan, P. Fu, *Energy Environm.Sci.* **4** (2011) 2451
- [16] Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland, Öko-Institut e.V., Freiburg 2019
- [17] G. Brauner: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Vieweg, Wiesbaden 2018
- [18] Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics Ltd., Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, 2018
- [19] Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, M. Klell, H. Eichseder, A. Trattner Hrsg., Springer Vieweg, Wiesbaden 2018