

Global Energy Solutions e.V.

For Prosperity and Climate Neutrality

BETRACHTUNG VERSCHIEDENER ANTRIEBSFORMEN FÜR SCHWERE LKW

September 2023

Inhalt

1. Einleitung	2
2. Probleme im aktuellen Diskurs	4
2.1 Sektorziele im Transportbereich	4
2.2 Der Restbudget-Ansatz	7
3. Betrachtung verschiedener Antriebsformen	12
3.1 Synthetische Kraftstoffe	15
3.2 Methanol und Methanol-Derivate	17
3.3 Hybride Anwendungen (Methanol mit Batterie)	18
3.4 HVO-Kraftstoffe	20
3.5 Gas	23
3.6 Wasserstoff	24
3.7 Brennstoffzelle	24
3.8 Batterieelektrik	26
3.9 Strom aus Oberleitungen	28
4. Empfehlung für eine Doppelstrategie	30
Anhang	33

1. Einleitung

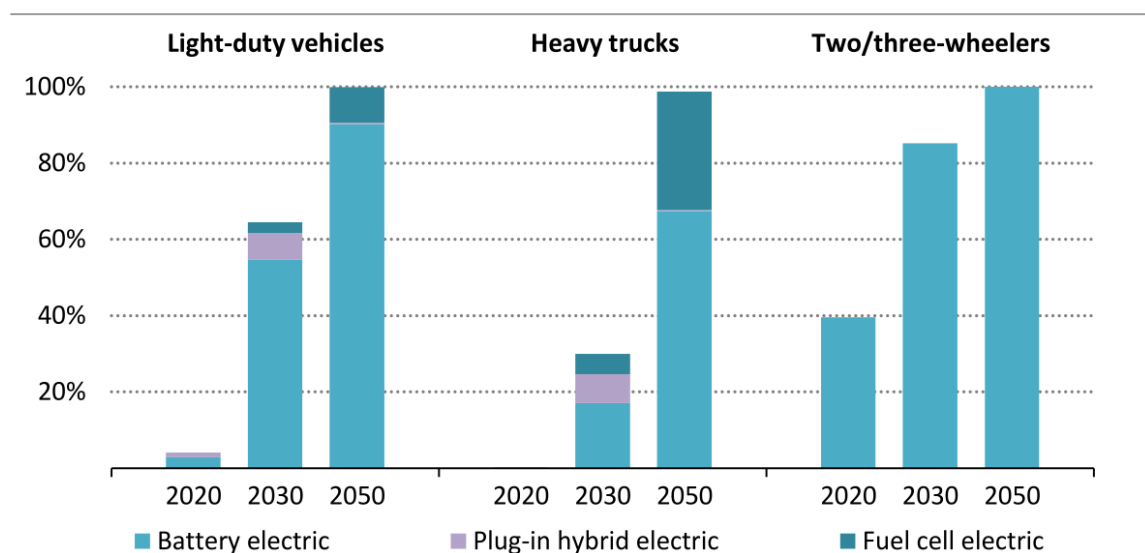
Die bisherigen Anstrengungen unserer Gesellschaften für mehr Klimaschutz zeigen, dass es besonders schwerfällt, im Transportsektor die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. Das liegt einerseits daran, dass Mobilität ein bestimmender Faktor unseres Wohlstands ist. Insbesondere der Transport von Gütern über den Wasser-, Land- oder Luftweg ist eine wesentliche Voraussetzung für das Funktionieren unseres Wirtschaftssystems. Reduziert man also die Menge des Transports, hat das Auswirkungen auf die Lebensbedingungen, den Wohlstand. Verhindert man den Aufbau geeigneter Transportinfrastrukturen, hindert man Gesellschaften daran, sich weiterzuentwickeln. Das ist insbesondere für ärmere Staaten relevant.

Andererseits basiert der Transportsektor darauf, dass Energie in extrem kompakter Form zur Verfügung steht. Bei Energieträgern in Form von Molekülen, wie Benzin, Diesel und Kerosin, ist das der Fall. Während ein Lkw fährt, transportiert er die Fracht, aber auch den Diesel, den er verbraucht. Technisch ist das der entscheidende Punkt: Ein Umstieg auf erneuerbare Energiequellen basiert auf Sonnen- und Windkraftwerken, die Energie in Form von Strom, also Elektronen zur Verfügung stellen. Entsprechende Batterien sind sehr schwer im Vergleich zur gespeicherten Energie, sodass sie weniger gut im Transportbereich einsetzbar sind, als Energieträger auf Molekülbasis.

Wie die meisten Wirtschaftsbereiche auch, befindet sich der Transportsektor im Umbruch. In den letzten Jahren sind eine Vielzahl unterschiedlicher Studien dazu verfasst worden, wie sich der Transportsektor im Zuge Klimawandel-induzierter Veränderungsprozesse entwickeln könnte. Eine Prognose kommt bspw. von der Internationalen Energieagentur (International Energy Agency, IEA), welche Anteile unterschiedliche Antriebsformen in Zukunft bekommen könnten. Abbildung 1 zeigt

dies exemplarisch. Die IEA prognostiziert diese Zahlen im Rahmen ihres Net Zero Szenarios. Jedoch ist festzustellen, dass unter veränderten Annahmen, die in verschiedene Studien einfließen, sehr verschiedene Ergebnisse entstehen. Dies betrifft z. B. Annahmen über technologische Entwicklungspfade, wie hoch Subventionen veranschlagt werden oder wie sich voraussichtlich die Wirtschaft und daraus abgeleitet das Transportvolumen entwickeln wird.

Figure 3.23 ▶ Global share of battery electric, plug-in hybrid and fuel cell electric vehicles in total sales by vehicle type in the NZE



IEA. All rights reserved.

Sales of battery electric, plug-in hybrid and fuel cell electric vehicles soar globally

Note: Light-duty vehicles = passenger cars and vans; Heavy trucks = medium- and heavy-freight trucks.

Abbildung 1: Projektion verschiedener Antriebsformen der International Energy Agency.¹

Die vorliegende Studie gibt einen Überblick, welche methodischen Herangehensweisen in der aktuellen Debatte zur klimafreundlichen Umgestaltung besser bzw.

¹ Vgl. IEA, International Energy Agency (2021). *Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector*.

schlechter geeignet sind und erläutert warum. Außerdem werden Handlungsempfehlungen erarbeitet, wie sich betroffene Akteure in der Transportlogistik im aktuellen Status quo verhalten können.

2. Probleme im aktuellen Diskurs

Am Beispiel des Berichts „Addressing the heavy-duty climate problem“² der Nicht-regierungsorganisation „Transport und Environment“ lassen sich einige grundlegende Probleme behandeln, wie das Thema Klimaschutz im Transportsektor aktuell diskutiert wird.

2.1 Sektorziele im Transportbereich

Dieser Bericht wirbt mit Nachdruck dafür, dass über eine sehr strikte Regulierung bestimmte Antriebstechnologien für Schwere Lkw (heavy-duty trucks) in Europa verstärkt zum Einsatz kommen, um die Emissionen extrem zu senken und damit die Ziele der Europäischen Union in dem Bereich zu erreichen. Dazu zählen z. B. batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge oder Antriebe auf Basis von grünem Wasserstoff. Die Studie diskutiert eine Deadline für Schwere Lkw mit konventionellen Antrieben für 2040, weil andernfalls das Ausphasen der genutzten Technologien zu lange dauert, um die Emissionsziele zu erreichen. Empfohlen wird deshalb ein **Zero Emission Sales Target** bereits im Jahr 2035 durchzusetzen. Bezug und Begründung ist, dass Schwere Lkw im Mittel 18 Jahre im Betrieb sind. Um im Jahr 2050 in dem Bereich keine Emissionen mehr zu haben, müssen Antriebsformen, die weiterhin Emissionen erzeugen, rechtzeitig vom Markt genommen werden. Andernfalls gerät das Erreichen der europäischen Klimaziele in Gefahr.

² Vgl. European Federation for Transport and Environment (2022): Addressing the heavy-duty climate problem. Im Internet unter: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/09/2022_09_Addressing_heavy-duty_climate_problem_final.pdf

Die Studie argumentiert entlang der Logik, dass einzelne Wirtschaftsbereiche unabhängig voneinander ihre Emissionen senken sollten, damit die Gesellschaft insgesamt klimafreundlicher wird – sogenannte Sektorziele. Aus ökonomischer Sicht sind Sektorziele jedoch weniger gut dafür geeignet, Klimaschutzziele effizient zu erreichen. Effizienz bedeutet hier, dass Emissionsreduktionen dort vorgenommen werden sollten, wo sie einfach und kostengünstig umsetzbar sind. Eine CO₂-Bepreisung, z. B. in Form einer CO₂-Steuer oder den Handel mit Emissionszertifikaten, lenkt die Wirtschaft in Richtung einer effizienten Reduktion der Treibhausgasemissionen. Sektorziele laufen einer effizienten Aufteilung der Reduktionen jedoch entgegen, weil sie künstliche Barrieren für eine optimale Verteilung der Reduktionen installieren. Unterschiedliche Sektoren haben unterschiedliche CO₂-Vermeidungskosten. Statt dort zu reduzieren, wo es im Vergleich am einfachsten und günstigsten ist, wird die Reduzierung zu hohen Vermeidungskosten in einzelnen Sektoren forciert, während andere Bereiche unter ihren technisch-ökonomischen Möglichkeiten bleiben. Ziel sollte es vielmehr sein, die Emissionen der Wirtschaft insgesamt zu senken. Eine effiziente Aufteilung der Lasten ist insbesondere deswegen unerlässlich, weil die gesteckten Reduktionsziele sehr ambitioniert sind. Den „Luxus“ von Ineffizienzen kann man sich in einer solchen Situation nicht leisten.³ Solche Ineffizienzen führen dazu, dass Deutschland zwar viel Geld für die Energiewende ausgibt, aber dennoch seine Ziele verfehlt.⁴

De facto werden die Probleme dieses Ansatzes jetzt schon an der realen Ausgestaltung der Politik ersichtlich. Im Verkehrssektor mit hohen Vermeidungskosten gelingt es nicht, die beschlossenen Sektorziele zu erreichen. Am Beispiel der bereits langanhaltenden Diskussionen um das deutsche Klimaschutzgesetz zeigt sich,

³ Vgl. Pittel, K. (2021) *Umsetzung der Klimaziele effizient gestalten*. ifo Schnelldienst 07/2021.

⁴ Vgl. Felbermayr, G., Peterson, S., Rickels, W. (2019) *Ein duales System der CO₂-Bepreisung in Deutschland und Europa*. Kiel Focus. Institut für Weltwirtschaft. Im Internet unter: <https://www.ifw-kiel.de/de/publikationen/kiel-focus/fuer-ein-duales-system-der-co2-bepreisung-in-deutschland-und-europa/>

wie schwierig es ist, eine aus ökonomischer Sicht sinnvolle Aufhebung der Sektorziele umzusetzen. Erst in diesem Jahr hat das Bundeskanzleramt die Aufhebung der Sektorziele mit in den „Entwurf des zweiten Gesetzes zur Änderung des Bundesklimaschutzgesetzes“⁵ übernommen. Eine Zusammenfassung der ökonomischen Argumente für und wider dem Ansatz der Sektorziele findet sich im Artikel „Helfen Sektorziele, den Klimaschutz effizient voranzutreiben?“.⁶ Sektorziele sind unter verschiedenen Bedingungen sinnvoll, z. B. wenn sie wissenschaftlich abgeleitet wurden, relevante Stakeholder einbeziehen und auf Änderungen wichtiger Randbedingungen reagiert werden kann. Für Deutschland ist das nur teilweise gegeben. In jedem Fall besticht die Einfachheit einer sektorübergreifenden CO₂-Bepreisung. Vor allem deswegen, weil die Anfälligkeit für Fehler und der notwendige Verwaltungsaufwand für das „Management der (Sektor-)Ziele“, um diesen Ansatz sinnvoll weiterverfolgen zu können, zu weiteren Kosten und zeitlichem Verzug in der Reaktion auf auftretende Veränderungen führen dürfte. Abbildung 2 zeigt beispielhaft eine Übersicht über die Sektorziele für Deutschland, ausgehend vom Jahr 2010 bis zum Jahr 2030.

Hat man einen übergreifenden CO₂-Bepreisungs-Mechanismus, der Reduktionen effizient über Sektoren hinweg bewirkt, spricht nichts dagegen, die Entwicklungen in einzelne Sektoren nachzuverfolgen. Alleinige Maßgabe für den Erfolg der Anstrengungen sollte jedoch das Gesamtreduktionsziel einer Ökonomie bzw. eines ökonomischen Verbundes sein, wie ihn die Europäische Union darstellt. Daher ist es zu begrüßen, dass die EU nun ein zweites Emissionshandelssystem (EU ETS II) für den Verkehrs- und Gebäudebereich etablieren wird. Dieses sollte mittelfristig

⁵ Vgl. Im Internet unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/klimaschutz/entwurf-eines-zweiten-gesetzes-zur-aenderung-des-bundes-klimaschutzgesetzes.html>

⁶ Vgl. Im Internet unter: <https://energiesysteme-zukunft.de/themen/debatte/sektorziele>

mit dem bereits bestehenden Handelssystem (EU ETS I) zusammengeführt werden.

Entwicklung und Zielerreichung* der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland in der Abgrenzung der Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetzes**

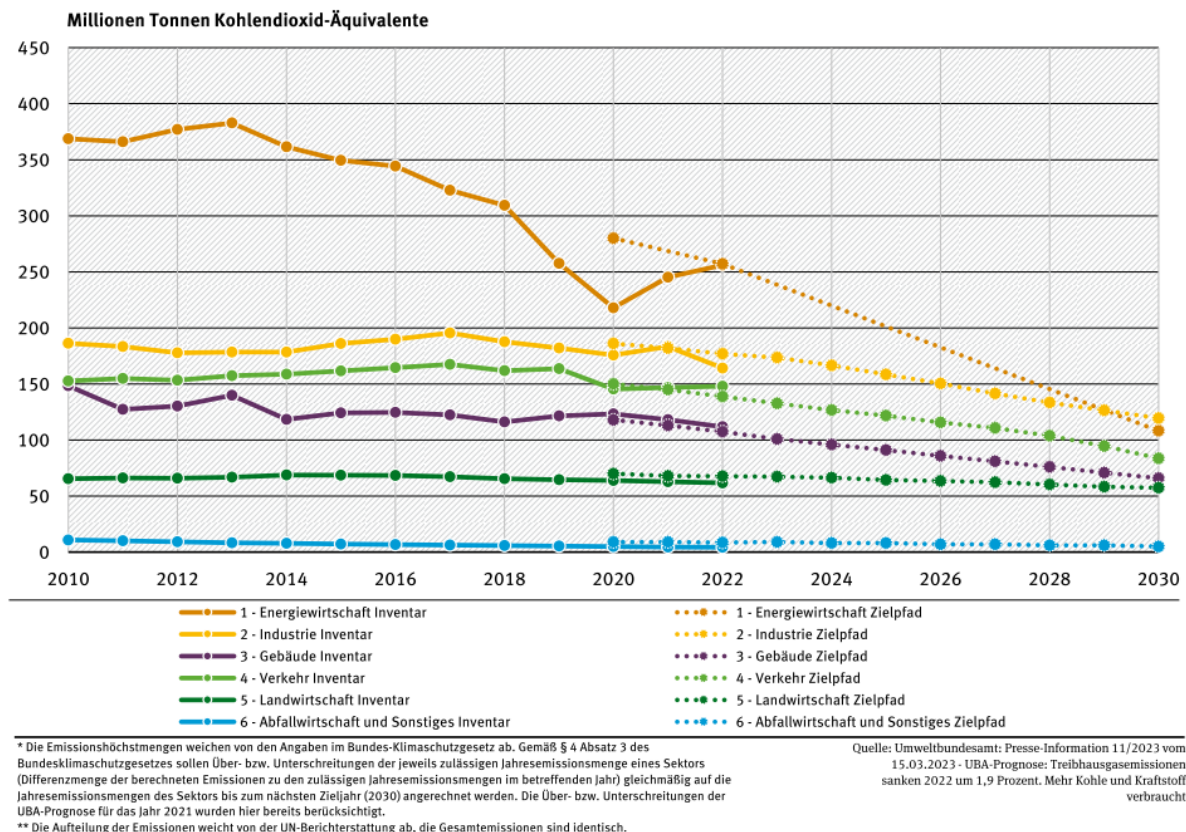


Abbildung 2: Sektorziele in Deutschland.⁷

2.2 Der Restbudget-Ansatz

Ein weiterer diskussionswürdiger Punkt in der genannten Studie ist das „Restbudget“ an Emissionen der EU. Ausgangspunkt ist die Feststellung, dass der Transportsektor heute expandiert, da die Anzahl der Lkw steigt und dieser Sektor der einzige ist, in dem die Emissionen gewachsen und nicht gesunken sind. Man sieht die Gefahr, dass diese Emissionen allein aus dem Lkw-Bereich das „Restbudget“

⁷ Vgl. Umweltbundesamt (2023). *Treibhausgasemissionsziele Deutschlands*. Im Internet unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasemissionsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg>

der EU an CO₂-Emissionen vollständig ausschöpfen könnten. Der Schwerlastverkehr ist für ca. 30 % der Emissionen des Straßenverkehrs bzw. 6 % der CO₂-Gesamtemissionen der EU ursächlich. Jedoch sollte der Ansatz eines verpflichtenden Restbudgets als solcher infrage gestellt werden. Richtig ist, dass sich die Staaten im Rahmen des Pariser Klimavertrags (offiziell: Übereinkommen von Paris) auf eine völkerrechtlich verpflichtende Obergrenze für die globale Erderwärmung geeinigt haben, das allseits bekannte 2°C-Ziel. Zusätzlich sollen sich die Staaten darum bemühen, die Begrenzung der Erderwärmung sogar auf 1,5°C zu limitieren.⁸ Völkerrechtlich verpflichtet bedeutet materiell jedoch nur wenig. Weder wurde festgelegt, welche Partei des Abkommens wie zu handeln bzw. was umzusetzen hat, noch kann eine Partei oder eine Kontrollinstanz eine Partei dazu verpflichten etwas zu tun, was sie nicht freiwillig tun möchte. Darüber hinaus kann man sich den Verpflichtungen auch jederzeit dadurch entziehen, dass man aus dem Vertrag aussteigt. Die USA haben das zwischenzeitlich vorgeführt, sind dann später wieder beigetreten und könnten in Zukunft unter einer anderen Präsidentschaft auch wieder austreten. Der Parisvertrag ist insofern nicht das benötigte wirkungsvolle Instrument, um die Klimaprobleme zu lösen.

Nun kann aus dem beschriebenen 2°C-Ziel aus klimaphysikalischer Sicht eine Menge an Treibhausgasen abgeleitet werden, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit dazu führt, dass die Erwärmung tatsächlich begrenzt wird. Aus globaler Sicht ergibt eine solche Menge für ein Restbudget durchaus Sinn, weil sie das Ziel auf eine messbare und beeinflussbare Größe der Treibhausgasemissionen herunterbricht. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt für unterschiedliche Temperaturobergrenzen ein zugehöriges Emissionsbudget, das mit

⁸ Vgl. z. B. die Darstellungen des Umweltbundesamtes dazu unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/uebereinkommen-von-paris#ziele-des-uebereinkommens-von-paris-uvp>

einer entsprechenden Wahrscheinlichkeit dafür geeignet ist, die jeweilige Obergrenze einzuhalten.

Allerdings ist zu erwähnen, dass es keine international verhandelten Budgets für einzelne Staaten gibt, die z. B. ein globales Budget, auf das man sich geeinigt haben müsste, auf staatliche Einflussbereiche aufteilen würden.

Hier lässt sich an die oben bereits geführte Diskussion anknüpfen, dass der effizienteste Weg, ein solches Ziel zu erreichen, eine global einheitliche CO₂-Bepreisung wäre. Da man sich im Zuge der Klimaverhandlungen in Kopenhagen 2009 von diesem Weg verabschiedet hat, ist es durchaus sinnvoll, dass einzelne Akteure mit einem gewissen globalen Einfluss, wie die Europäische Union, eigene Wege gehen und z. B. im Rahmen gewisser Wahrscheinlichkeiten eigene Emissionsbudgets ableiten. Jedoch sollte darauf geachtet werden, dass man sich an die Tatsachen hält und angesichts einer gescheiterten globalen Einigung nicht so tut, als ob ein solches EU-Emissionsbudget völkerrechtlich verpflichtend sei. Es gibt nicht einmal konkrete Verpflichtungen für das individuelle Handeln der einzelnen Staaten, wie das globale 2°C-Ziel erreicht werden soll.

Explizite, völkerrechtlich verbindende und an ein Budget geknüpfte Handlungspflichten einzelner Staaten gibt es daher nicht (außer diese beschließen entsprechende Gesetze – die sie aber auch wieder ändern können). Weil dies so ist, wird das 2°C-Ziel und damit auch das 1,5°C-Ziel nicht erreicht werden. Die einzige internationale Verpflichtung der Staaten besteht darin, in gewissen Abständen die eigenen freiwilligen Beiträge zu den Emissionsgrenzen an das Klimasekretariat zu übermitteln. Hier stellt man bislang wenig überraschend fest, dass die Summe der freiwilligen nationalen Anstrengungen bei weitem nicht ausreichen, um die definierten Ziele zu erreichen.

Table SPM.2 | Estimates of historical carbon dioxide (CO₂) emissions and remaining carbon budgets. Estimated remaining carbon budgets are calculated from the beginning of 2020 and extend until global net zero CO₂ emissions are reached. They refer to CO₂ emissions, while accounting for the global warming effect of non-CO₂ emissions. Global warming in this table refers to human-induced global surface temperature increase, which excludes the impact of natural variability on global temperatures in individual years.
{Table 3.1, 5.5.1, 5.5.2, Box 5.2, Table 5.1, Table 5.7, Table 5.8, Table TS.3}

Global Warming Between 1850–1900 and 2010–2019 (°C)		Historical Cumulative CO ₂ Emissions from 1850 to 2019 (GtCO ₂)				
1.07 (0.8–1.3; likely range)		2390 (± 240; likely range)				
Approximate global warming relative to 1850–1900 until temperature limit (°C) ^a	Additional global warming relative to 2010–2019 until temperature limit (°C)	Estimated remaining carbon budgets from the beginning of 2020 (GtCO ₂)				
		Likelihood of limiting global warming to temperature limit ^b				
		17%	33%	50%	67%	83%
1.5	0.43	900	650	500	400	300
1.7	0.63	1450	1050	850	700	550
2.0	0.93	2300	1700	1350	1150	900

^a Values at each 0.1°C increment of warming are available in Tables TS.3 and 5.8.

^b This likelihood is based on the uncertainty in transient climate response to cumulative CO₂ emissions (TCRE) and additional Earth system feedbacks and provides the probability that global warming will not exceed the temperature levels provided in the two left columns. Uncertainties related to historical warming (±550 GtCO₂) and non-CO₂ forcing and response (±220 GtCO₂) are partially addressed by the assessed uncertainty in TCRE, but uncertainties in recent emissions since 2015 (±20 GtCO₂) and the climate response after net zero CO₂ emissions are reached (±420 GtCO₂) are separate.

^c Remaining carbon budget estimates consider the warming from non-CO₂ drivers as implied by the scenarios assessed in SR1.5. The Working Group III Contribution to AR6 will assess mitigation of non-CO₂ emissions.

Abbildung 3: Emissionsbudgets nach IPCC für unterschiedliche Temperaturobergrenzen bei entsprechenden Wahrscheinlichkeiten.⁹

Die Entscheidung über die Zielerreichung fällt wegen der globalen Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklungen tendenziell in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Hier leben mehr Menschen als in anderen Erdteilen, die wirtschaftlich voranschreiten wollen und dabei viele fossile Energieträger verbrauchen. Dies auch deshalb, weil dort die Bevölkerung rasch weiter wächst. Eine weitsichtige Klimapolitik setzt dort an, vor allem auch deswegen, weil man dort wegen der wirtschaftlichen Situation für vergleichsweise wenig Geld viel für den Klimaschutz erreichen könnte. Eine Sichtweise, die sich auf die Definition nationaler Emissionsbudgets beschränkt

⁹ Vgl. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Im Internet unter: https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

und enorme Ressourcen in deren Einhaltung investiert, während an anderer Stelle in Sinne einer globalen Zielerreichung viel effizientere Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt werden könnten – was jedoch nicht geschieht –, verfehlt das Ziel.

In diesem, mit Denkfehlern behafteten, Frame bewegen sich viele Studien, Berichte und Diskussionsbeiträge, u. a. auch die anfangs zitierten Studien der Nichtregierungsorganisation „Transport & Environment“.

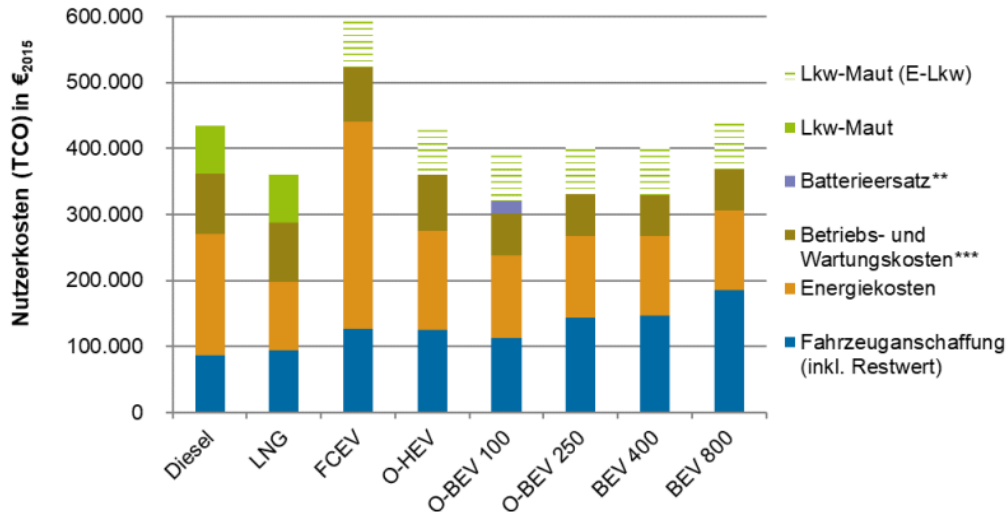
In Bezug auf den Transportsektor und den Schwerlastverkehr in Europa hieße das, dass es zur Begrenzung der Emissionen in dem Bereich sinnvoll wäre, darüber nachzudenken, wie globale Wertschöpfungsketten klimafreundlich organisiert werden könnten. Technologisch findet der Hochlauf jedweder Antriebsform in jedem Fall global statt. Die aktuellen Lieferketten in dem Bereich sind ja global.

Eine rein nationale Betrachtung und entsprechende Regelsysteme ohne globalen Blick fördern den globalen Klimaschutz – wenn überhaupt – nur gering. Nationales Handeln ohne adäquate Einbettung in den internationalen Kontext kann sogar schädlich sein, wenn die eingesetzten Beitragsvorschläge international nicht anschlussfähig sind, z. B. die internationalen Wertschöpfungsketten nur geringe Beachtung bei deren Ausarbeitung gefunden haben. Auch negative ökonomische Auswirkungen durch nationale Regulierungen sind zu erwarten. Im schlechtesten Fall steht ein Staat wie Deutschland in ökonomisch geschwächter Form den herausfordernden Folgen des globalen Klimaschutzes gegenüber. In einer solchen Lage kann man sich immer weniger den eigentlich notwendigen globalen Anstrengungen widmen und dort wichtige Beiträge leisten, weil die Entscheidungsträger vorrangig damit ausgelastet sind, nationale Probleme zu lösen – wenn diese Probleme aber aus globalen Zusammenhängen resultieren, ist eine wirksame nationale Lösung per se nicht möglich. Dies müssen aktuell die Menschen in Großbritannien nach dem Brexit erfahren.

3. Betrachtung verschiedener Antriebsformen

Wie sich die Lkw-Flotten entwickeln werden, ist zum aktuellen Zeitpunkt schwer zu prognostizieren. Wie bereits erwähnt, ist die Entwicklung unterschiedlicher politischer Einflussfaktoren aber auch technischer sowie wirtschaftlicher Faktoren entscheidend dafür, wie die Treibhausgas-Emissionen im Transportsektor in den kommenden Jahrzehnten (netto) reduziert werden können. Damit engstens verbunden ist die Frage nach der Antriebsform Schwerer Lkw und deren Zusammensetzung über die Gesamtflotte der Fahrzeuge.

Abbildung 4 zeigt die Kosten unterschiedlicher Antriebssysteme in einer Modellierung im Jahr 2025 als Total Cost of Ownership (TCO), um einen groben Überblick über die Marktsituation zu bekommen. Abbildung 5 zeigt in einer anderen Modellierung den Bestand und die Neuzulassungen an Lkw für Deutschland bis 2045. In diesem Beispiel wird die gesamte Flotte an Verbrennungsmotoren sukzessive durch Elektro- und Brennstoffzellen-Antriebe ersetzt.



* Kosten exkl. MwSt., 5 Jahre Nutzungsdauer, 120.000 km p.a. O-Lkw mit 50 % Fahranteil unter Oberleitung

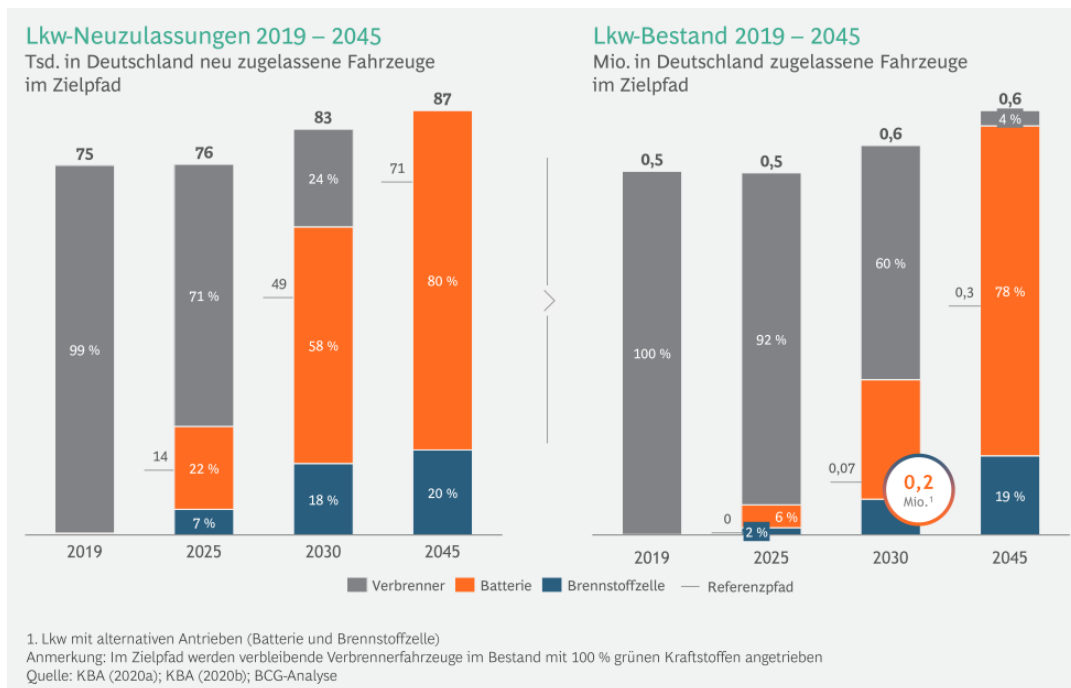
FCEV: Brennstoffzellen-Lkw, O-HEV: Oberleitungsgebundener Hybrid-Lkw mit Verbrennungsmotor, O-BEV 100: Oberleitungsgebundener batterieelektrischer Lkw mit 100 km elektrischer Reichweite; BEV 400/800: Batterieelektrischer Lkw mit 400/800 km Reichweite

** Austausch der Batterie nach Erreichen der maximalen Zyklenzahl

*** Wartung, Reparatur, Schmierstoffe, AdBlue

Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut (Kühnel et al. 2018)

Abbildung 4: Kosten von Sattelzugmaschinen abhängig von der Antriebsart.¹⁰



1. Lkw mit alternativen Antrieben (Batterie und Brennstoffzelle)

Anmerkung: Im Zielpfad werden verbleibende Verbrennerfahrzeuge im Bestand mit 100 % grünen Kraftstoffen angetrieben

Quelle: KBA (2020a); KBA (2020b); BCG-Analyse

Abbildung 5: Bestand und Neuzulassungen von Lkw 2019-2045.¹¹

¹⁰ Vgl. Vgl. Ökoinstitut e.V. (2020). *StratON – Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht*. Im Internet unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>

¹¹ Vgl. Boston Consulting Group (2021). *Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*. Im Internet unter: https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021_bdi_klimapfade_2.0_-_gesamtstudie_-_vorabve

Die Europäische Kommission sieht hingegen eine andere Entwicklung, wie Abbildung 6 zeigt. Hier steigt die Anzahl an Fahrzeugen in dem betrachteten Bereich, die auf der Verbrennung von Diesel basieren, sogar von 6 auf 7 Millionen Fahrzeuge an. Lediglich der erwartete Zuwachs der Gesamtflotte wird über Fahrzeuge mit Motoren zur Verbrennung von Gasen, Brennstoffzellen und Batterien gedeckt.

Daher werden in der Folge die unterschiedlichen Antriebsformen beschrieben und bewertet, die aus Sicht der Autoren eine Relevanz für die Branche haben.

Figure 43: Outlook of HDVs by type and fuel

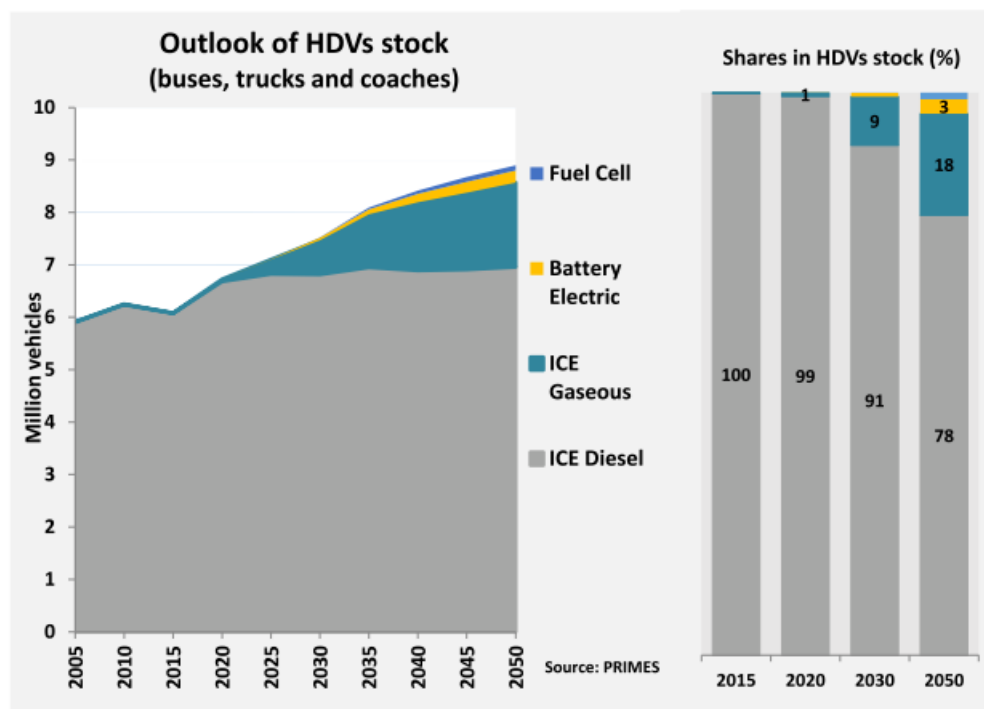


Abbildung 6: Entwicklung der Schwere Lkw, Busse und Fernbusse im EU-Referenzscenario 2020.¹²

¹² Vgl. European Commission (2020). *EU Reference Scenario 2020 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050*. Im Internet unter: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/96c2ca82-e85e-11eb-93a8-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-219903975>

3.1 Synthetische Kraftstoffe

Synthetische Kraftstoffe als Fortsetzung heutiger Kraftstoffe für Lkw, insbesondere Diesel, sind aus Sicht von Global Energy Solutions die vielversprechendste Lösung für eine Klimaneutralität im Bereich der Mobilität Schwerer Lkw. Zunächst betrifft das Methanol-Diesel und -Benzin. Ein wesentlicher Punkt ist, dass mit synthetischen Kraftstoffen die gesamte weltweite Bestandsflotte von 1,3 Milliarden Autos mit Verbrennungsmotoren – darunter 300 Millionen Lkw – durch Beimischung sukzessive in Richtung Klimaneutralität geführt werden könnte. Dabei können vorhandene Infrastruktur sowie vorhandene Fahrzeuge weiter genutzt werden („Umbau statt Abriss“).

In der Diskussion um synthetische Kraftstoffe ist man sich weitgehend einig, dass die Verfügbarkeit dieser Energieträger und deren Vorprodukte wie Wasserstoff in der Anfangsphase des Hochlaufs begrenzt ist. Die langsam anwachsenden Mengen sollten daher den Anwendungen vorbehalten bleiben, die am schlechtesten auf andere Formen der Energie, insbesondere Strom, umzustellen sind. Dazu zählen die Flugindustrie und die Schifffahrt. Danach kommt direkt der Transport auf dem Landweg und hier geht es in absteigender Reihenfolge um die schwersten Lkw. In der Diskussion ist auch größtenteils unumstritten, dass der Transport mithilfe der Batterieelektrik insbesondere für leichte Fahrzeuge mit geringen Reichweiten eine Rolle spielen wird. Was heute niemand mit Sicherheit sagen kann, ist, wo die Grenze, ist an der man besser synthetische Kraftstoffe bzw. batteriegetriebene Fahrzeuge verwendet. Dazwischen liegen die anderen, weiter unten behandelten Antriebsformen. Für eine optimale technologische Lösung spielen weiterhin Rahmenbedingungen, wie die allgemeine Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom, Wasserstoff aber auch die bereits existierende Infrastruktur sowie die zurückzulegende Strecke über flache Ebenen bzw. über bergige Regionen eine Rolle.

Bereits heute sind die Wertschöpfungsketten für Fahrzeuge, aber auch für die entsprechenden Treibstoffe, global. Im Sinne der Argumentation des Kapitels 2 wäre ein Umbau der existierenden globalen Wertschöpfungsnetzwerke im Sinne des globalen Klimaschutzes angeraten. Dabei würde auf dem Status quo auf globaler Ebene aufgesetzt. Global Energy Solutions denkt hier insbesondere an **reFuels**,¹³ die aus der Kopplung von Low-Carbon-Wasserstoff mit Kohlenstoff entstehen werden. Hier lassen sich Potenziale aus der Kopplung unterschiedlicher Sektoren heben, da der notwendige Kohlenstoff in Form von abgefangenem CO₂ aus Punktquellen bereitgestellt werden könnte. Dazu zählen z. B. Kohle- aber auch Gaskraftwerke sowie Anlagen der Zementproduktion. An diesem Beispiel lässt sich gut erkennen, dass Klimaziele im Sinne von Verpflichtungen innerhalb einzelner Sektoren (Sektorziele) solche Sektorkopplungen erschweren.

Die Art des benutzten Kohlenstoffs hat einen Einfluss darauf, wie die Klimaneutralität der reFuels hergestellt wird. Wird das CO₂ bspw. mithilfe einer Direct-Air-Capture-Technologie abgefangen, dann ist Klimaneutralität gegeben. Handelt es sich um CO₂ biogenen Ursprungs (z. B. über die Vergasung/Verbrennung von Biomasse), gilt dasselbe. In allen anderen Fällen wird vorgeschlagen, die Kraftstoffe dadurch klimaneutral zu stellen, dass – vor der tatsächlichen Bereitstellung auf dem Markt – über **CO₂-Removals** die späteren CO₂-Emissionen auf Dauer der Atmosphäre entzogen werden. Solche Removals sind bspw. möglich, indem Altholz bzw. Holzabfälle pyrolysiert werden. Dabei wird sowohl Wärme und Strom erzeugt, im Wesentlichen aber Kohlenstoff, der z. B. zur Verbesserung des Bodens einge-

¹³ Vgl. Global Energy Solutions (2022): Klimaneutralität für 1,3 Milliarden PKW und LKW: Ohne E-Fuels geht es nicht. Im Internet unter: https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/11/221031_efuels_final_DT.pdf

setzt werden kann. Er ist dann für hunderte Jahre sicher deponiert und trägt gleichzeitig zur Ernährung der Menschheit bei. Der Kohlenstoff ist sicher im Boden und daher aus der Atmosphäre entfernt, ein Removal.

Es gibt weltweit zunehmend Bewegungen in Richtung synthetischer Kraftstoffe. Je nach vorhandenen Rahmenbedingungen können diese auch eine Lösung für die weltweiten Pkw mit Verbrennungsmotoren bieten. Es ist klar, dass eine Art von Batterieelektrik für den weltweiten Bestand nur einen Beitrag darstellen kann, also keine generelle Lösung ist – dies angesichts der Verhältnisse in vielen sich entwickelnden Ländern, des massiven Zuwachses an Bevölkerung, der weiteren Verstädterung, des Baus von Riesenstädten usw. Ausnahmen sind heute schon **Kleinfahrzeuge**, sog. Tuk-Tuks, die in den Großstädten, vor allem der sich entwickelnden Welt, als low-cost Taxis eine große Rolle spielen. Sie tragen bisher zur hohen **Luftverschmutzung** der Städte bei und sind wegen ihres geringen Gewichts leicht zu elektrifizieren. Das ist aber nur ein Segment des Verkehrs in den Städten.

Die Realitäten vor Ort in den Entwicklungs- und Schwellenländern sind nicht schlagartig zu ändern. Aufgrund der globalen Dynamik in beiden Bereichen, sowohl bei den synthetischen Kraftstoffen, als auch bei den Batterieantrieben sollte für Rahmenbedingungen in Europa argumentiert werden, die beides ermöglichen. Eine Abschottung gegen die eine oder andere Antriebsform gefährdet die Wettbewerbsfähigkeit unserer Wirtschaft, weil diese u. U. von einzelnen Technologiebereichen ausgeschlossen wird.

3.2 Methanol und Methanol-Derivate

Vielversprechend ist zukünftig der Strang der synthetischen Kraftstoffe, der auf Methanol aufbaut. Methanol kann aus Wasserstoff und CO₂ hergestellt werden und ist somit selbst ein synthetischer Kraftstoff. Auf diesen setzt auch **Porsche** mit

seinem Projekt „Haru Oni“ in Südchile. Bei Methanol ist die Frage, ob man es weiterverarbeitet, z. B. zu Methanol-Benzin oder -Diesel, oder ob man es direkt in einem Methanolmotor verbrennt. So existierten im Jahr 2019 bspw. rund 20.000 reine Methanolfahrzeuge in China und es wird erwartet, dass die Zahl signifikant steigen wird.¹⁴

Die Methanol-Derivate Methanol-Diesel und -Benzin sind mit heutigem Benzin bzw. Diesel chemisch praktisch identisch und können daher problemlos jedem Benzin-/Diesel-Kraftstoff in jedem Verhältnis beigemischt werden. In China wird selbst reines Methanol mit konventionellem Benzin gemischt und verwendet. Unterschiedliche Provinzen bieten Mischverhältnisse mit 10 % Methanol (M10), über 85 % Methanol (M85) bis hin zum Einsatz von 100 % methanolbasiertem Treibstoff an (M100).

Wie erwähnt, kann man auch daran arbeiten, neben Pkw auch Lkw direkt mit Methanol zu betreiben. Dazu muss eine Zündkerze in den Motor eingesetzt werden, um Methanol direkt zu verbrennen.

3.3 Hybride Anwendungen (Methanol mit Batterie)

Obrist hat für den Pkw-Bereich eine Anwendung entwickelt, bei der ein kleiner Elektromotor permanent im optimalen Bereich betrieben wird. Diese Technologie kann als hybride Anwendung bezeichnet werden. Ein kleiner Motor wird unter Einsatz von Methanol zur Erzeugung von Strom verwendet, der in eine kleine Batterie eingespeist wird. Das Fahrzeug selbst wird dann elektrisch über diese Batterie betrieben.

¹⁴ Vgl. Methanol Institute (2021). *Methanol Fuel in China*. Herausgegeben von: China Association of Alcohol and Ether Fuel and Automobiles (CAAEEFA). Im Internet unter: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/China-Methanol-Fuel-Report-2020_final-1.pdf

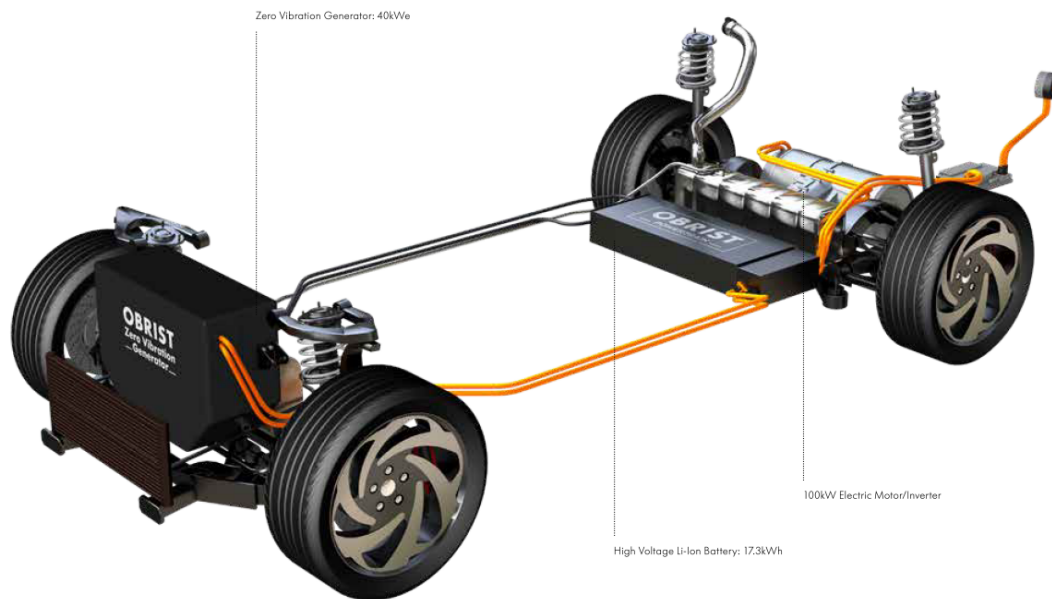


Abbildung 7: Schematische Darstellung des OBRIST HyperHybrid.¹⁵

Der Motor wird mit einem Methanol auf Basis von Elektrolyse-Wasserstoff (E-Methanol) betrieben, das aufgrund von Patenten von **Obrist** im Gesamtkonzept so produziert wird, dass netto mehr CO₂ aus der Atmosphäre entnommen wird, als bei der Verbrennung des Methanols entsteht. Dies gelingt über das Einfangen von CO₂ über eine Direct-Air-Capture-Anlage. Im Sinne des Gesamtkonzepts wird dort also – parallel zur Verbrennung des Methanols – der Atmosphäre zusätzliches CO₂ entzogen. Es wird empfohlen zu prüfen, inwiefern dieses Konzept auf den Bereich der Lkw ausgedehnt werden könnte, sodass letztlich der Lkw mit einem synthetischen Kraftstoff seinen eigenen Strom für eine eigene, relativ kleine Batterie permanent produziert. Der Lkw führe dann elektrisch, aber auf der Basis eines Verbrenner-Inputs.

¹⁵ Vgl. die Broschüre von OBRIST zu diesem Thema unter: https://www.obrist.at/wp-content/uploads/2021/09/OB0448-21_HyperHybrid_Broschuere_doublepage_01_RZ_WEB_en.pdf

3.4 HVO-Kraftstoffe

HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)-Kraftstoffe sind synthetische Kraftstoffe auf der Basis von biogenem Material, insbesondere natürliche Pflanzenöle und -fette. Mit Hilfe von Wasserstoff werden diese katalytisch umgesetzt, um HVO zu produzieren. Dabei entstehen Kohlenwasserstoff-Gemische, die teilweise sogar bessere Eigenschaften haben als vergleichbare Kohlenwasserstoffe wie Kerosin und Diesel auf Basis von Erdöl.

Bis zum Jahr 2025 werden Produktionskapazitäten installiert sein, die jährlich 30 Millionen Tonnen HVO herstellen können. Abbildung 8 zeigt die Produktionskapazitäten unterschiedlicher Regionen in den Jahren 2020 und 2025. Im Vergleich zum weltweiten Dieserverbrauch von rund 800 Millionen Tonnen, ist die HVO-Menge noch relativ gering. In Deutschland wurden im Jahr 2021 etwa 27 Millionen Tonnen Diesel verbraucht, was in etwa der realisierten Menge HVO im Jahr 2025 entspricht.

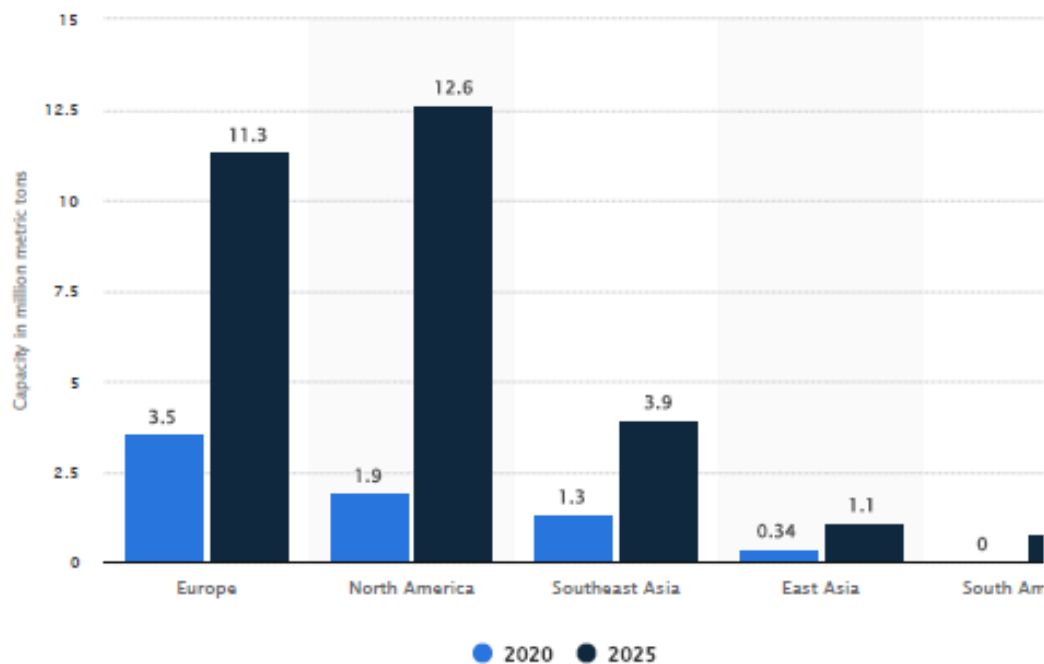


Abbildung 8: Weltweite HVO-Produktionskapazität 2020, Prognose für 2025.¹⁶

¹⁶ Vgl. statista 2022, HVO Global HVO biodiesel capacity worldwide in 2020 with forecast 2025

Für die Produktion von HVO kommen pflanzliche Altöle und -fette infrage, die unter aktuellen Umständen verbrannt würden und somit nicht in Konkurrenz zu Lebensmitteln stehen. Teilweise kommen auch tierische Abfälle und solche aus der Fischverarbeitung infrage. Die CO₂-Bilanz hängt im Wesentlichen davon ab, ob der eingesetzte Wasserstoff klimafreundlich ist oder nicht. Bei der Verwendung von Low-Carbon-Wasserstoff aus erneuerbarer Energie fallen 90 % weniger Emissionen an, als bei konventionellem Diesel. Wird Wasserstoff aus Erdgas (ohne Carbon Capture and Storage) verwendet, ist immer noch eine Reduktion der Emissionen um rund 50 % möglich.

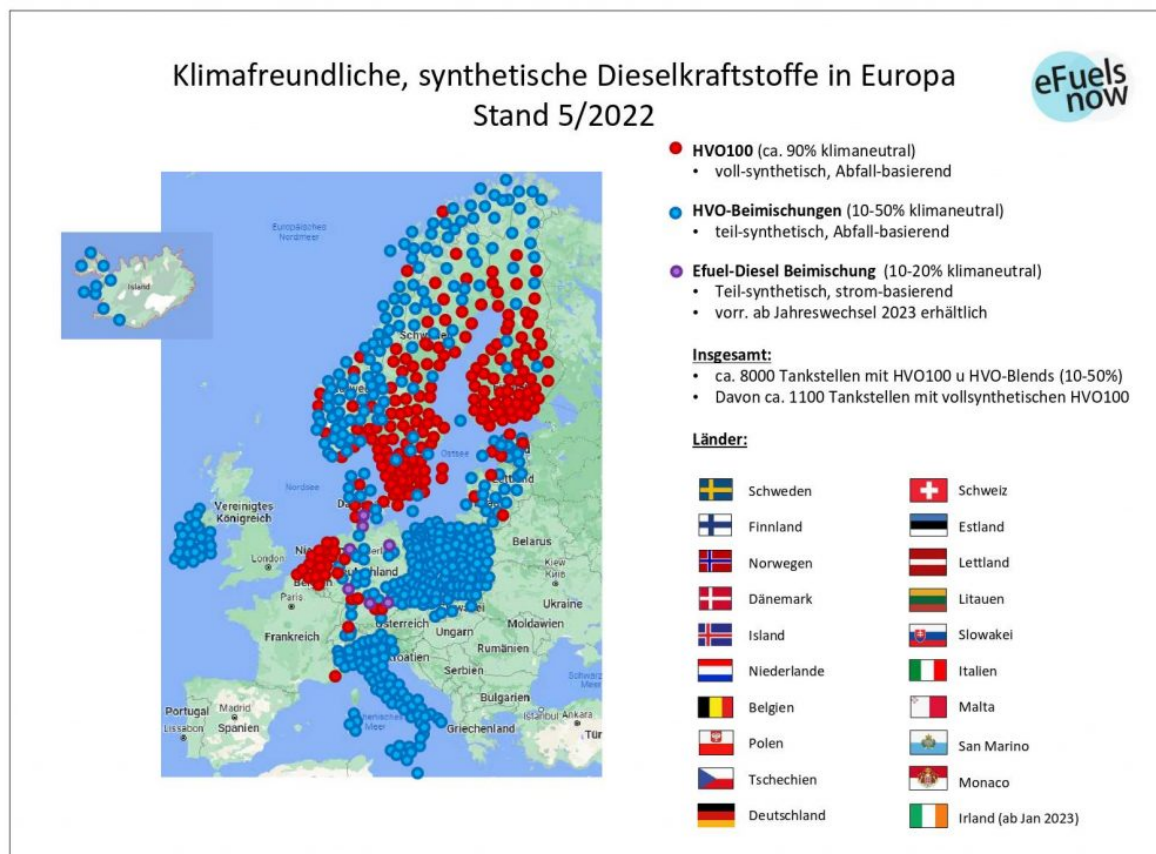


Abbildung 9: Tankstellenkarte“ für HVO-haltige Dieselkraftstoffe in Europa.¹⁷

¹⁷ Vgl. die Ausführungen von eFuelsNow im Internet unter: <https://efuelsnow.de/tankstellen-karte>

Es gibt mittlerweile in Europa eine wachsende Zahl von HVO-Tankstellen. Der Weg in die Praxis ist weit fortgeschritten. In Deutschland wird die HVO-Kraftstoff-Technologie insbesondere in Baden-Württemberg geduldet. Robert Bosch hat vor kurzem mit Sondergenehmigung einen größeren Feldversuch mit eigenen HVO-Tankstellen gestartet, testet den Kraftstoff in der eigenen Flotte, ist mit den bisherigen Ergebnissen zufrieden und weitet die Aktivitäten aus. Der Ansatz hat den Vorteil, dass die Fahrzeuge und ihre Motoren wie bisher genutzt werden können. Allerdings sind die Volumina nicht beliebig ausdehnbar, weil es dafür nicht genügend Reststoffe und folglich auch nicht genügend HVO-Kraftstoffe gibt, um konventionellen Diesel komplett zu ersetzen.

In Europa ist HVO an etwa 8.000 Tankstellen verfügbar. Eine Übersicht findet sich auf der Internetseite der Organisation eFuelsNow.¹⁸ Dabei finden sich die höchsten Tankstellendichten für 100 %iges HVO in den Niederlanden, Schweden und Finnland. Beimischungen von HVO von 10-50 % finden sich in den Niederlanden, Italien, Polen, Irland und Norwegen. Weiterhin gibt es größere Mengen in Österreich, Slowenien und Ungarn.

Weltweit wurden im Jahr 2021 etwa 213 Millionen Tonnen Pflanzenöle produziert. Nach deren Verwendung wurde der Großteil davon thermisch verwendet oder zu konventionellem Biodiesel verarbeitet. Da der weltweite Markt für Altöle und -fette wenig transparent ist, ist die Spannweite für das mögliche Potenzial von HVO relativ groß: Eventuell könnten jährlich 50-80 Millionen Tonnen hergestellt werden, was dann 6-10 % des derzeitigen Dieserverbrauchs entspräche. Auch in der Flugindustrie könnten die genannten Altöle und -fette eingesetzt werden, nachdem man sie in einem ähnlichen Prozess in Kerosin umgewandelt hat.

¹⁸ Im Internet unter: <https://efuelsnow.de/tankstellen-karte>

Abbildung 10 zeigt auf, dass der Einsatz von HVO nicht nur Vorteile in Hinblick auf Treibhausgas-Emissionen haben kann, sondern dass auch Emissionen reduziert werden können, die eher die Gesundheit der Menschen in direktem Sinne beeinträchtigen, wie z. B. Stickoxide (NO_x) oder Kohlenstoffmonoxid (CO).

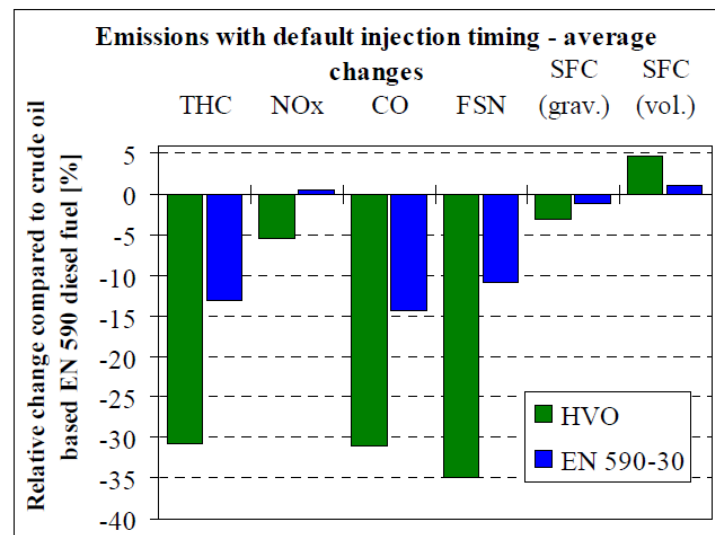


Abbildung 10: Abgasqualität von HVO und von einem HVO/Diesel 30/70-Gemisch im Vergleich zu 100% Diesel

Quelle: Aatola, H. et al (2008)

Sofern sich eine Anzahl von Spediteuren für das Beibehalten der bisherigen Verbrennungsmotoren entscheidet, kann für eine Gruppe von ihnen der Wechsel auf HVO-Kraftstoffe eine einfache Möglichkeit sein, sich in Richtung Klimaneutralität zu bewegen. U. U. kann man so auch einfach Zeit gewinnen. Einige Fahrzeuge dieses Typs kann man auch einfach dazu nutzen, um Erfahrungen zu sammeln.

3.5 Gas

Gas ist generell eine attraktive Lösung für das Betreiben von Lkw. Im Prinzip können Motoren des bisherigen Typs eingesetzt werden. Das Speichervolumen für Gas im Fahrzeug ist hoch und es gibt viele Erfahrungen mit dessen Einsatz. Das Problem ist, dass der Einsatz von Gas bisher nicht als klimaneutral anerkannt wird. Es

gibt Anstrengungen bei Lkw, das CO₂ aus der Verbrennung abzufangen, was bisher aber nur partiell gelingt. Alternativ oder ergänzend könnte man das CO₂ vorab über Removals ausgleichen/kompensieren, was zu Extrakosten von etwa 10 % führen würde. Hierbei sollte darauf gedrungen werden, dass der Anbieter des Kraftstoffs diesen Teil direkt übernimmt. Die Kosten könnten allerdings weitestgehend dadurch aufgefangen werden, dass im Gegenzug die Klimaabgaben entfallen würden. Solange allerdings die EU-Regulierung an dieser Stelle keine neuen Fenster eröffnet, gibt es bei Gas prinzipielle Schwierigkeiten, die eine langfristige Orientierung in diese Richtung hin erschweren. Unter aktuellen Bedingungen kommt die schwierige Situation mit der Verfügbarkeit von Gas und dessen Preis hinzu.

3.6 Wasserstoff

Das Unternehmen Voith hat sich ausführlich mit der Frage der Verwendung von Brennstoffzelle in Lkw beschäftigt, ist jedoch zu dem Schluss gekommen, dass die Komplexität des Thermomanagements der Brennstoffzelle dagegenspricht, diese Lösung in einem ersten Schritt zu verfolgen. Als Folge der Untersuchungen arbeitet Voith jetzt an der direkten Verbrennung des Wasserstoffes in einem Motor. Technisch gesehen ist diese Vorgehensweise mit der Verbrennung von Gas verwandt, weswegen man zu gewissen Anteilen von den Erfahrungen profitieren kann, die man mit Gasmotoren bereits über viele Jahre gesammelt hat. Wie immer beim Wasserstoff bleibt bei der direkten Verbrennung in einem Motor das Problem des „Handlings“ des Wasserstoffs. Als leichtestes Gas unter den chemischen Elementen ist dieses nur unter hohen Drücken und/oder niedrigen Temperaturen praktikabel für die Anwendung und den Transport des Gases.

3.7 Brennstoffzelle

Die Wasserstoff-Brennstoffzelle wird in der aktuellen Diskussion als attraktive Alternative zu den bisher beschriebenen Energieträgern und Verfahren gesehen. Mit

H2Accelerate – einer Kooperation zwischen Daimler Truck, IVECO, Linde, OMV, Shell, TotalEnergies und der Volvo-Group – gibt es bspw. einen Verbund von Wasserstoffproduzenten, Infrastrukturbetreibern sowie Fahrzeugherstellern, der sich die Verwendung von Wasserstoff zur Dekarbonisierung von Schwerlast-Langstreckentransporten in ganz Europa zum Ziel gesetzt hat. In der Brennstoffzelle kommt Low-Carbon-Wasserstoff zum Einsatz. Der Wasserstoff könnte im Sinne der europäischen Definition z. B. ein grüner Wasserstoff sein. Möglicherweise würde auch ein blauer Wasserstoff zugelassen (Ausgangsstoff ist hier Erdgas mit anschließendem Carbon Capture and Storage), was die Versorgungssituation in Europa insgesamt sehr verbessern würde. Die Brennstoffzellen-Technologien haben vieles gemeinsam mit der Nutzung von Benzin und Diesel. Es ist möglich, substantziell große Mengen von Energie im Fahrzeug zu transportieren und zu nutzen. Das gilt auch für große Distanzen, die man problemlos überbrücken kann.

Es ist allerdings festzustellen, dass man eine geeignete Infrastruktur benötigt und dass der Umgang mit Wasserstoff alles andere als einfach ist, wie bereits weiter oben erwähnt wurde. Geht man davon aus, dass Wasserstoff eine Rolle spielen wird, stellt sich die Frage der Speicherung an Bord des Fahrzeugs. Hyundai verwendet derzeit 350-bar-Tanks. Shell glaubt, dass 500 bar der optimale Punkt wäre. Nikola setzt Tanks mit 700 bar ein und Daimler Truck setzt auf flüssigen Wasserstoff, gespeichert bei -253 Grad Celsius.

In der Summe kann man daraus ableiten, dass es in diesem Bereich unterschiedliche, interessante Ansätze und Entwicklungen gibt. Allerdings ist aus heutiger Sicht nicht mit Sicherheit zu sagen, ob und wenn ja inwiefern die Brennstoffzelle einmal großflächig im Transportsektor eingesetzt werden wird. Um den Anschluss in diesem Technologiefeld nicht zu verlieren, scheint es daher sinnvoll zu sein, zu

verfolgen, welche Entwicklungen stattfinden und u. U. mit einzelnen Fahrzeugen Erfahrungen zu sammeln.

Interessant ist in diesem Kontext das Ergebnis eines im September 2022 veröffentlichten White Papers von H2Accelerate,¹⁹ das die erwarteten Gesamtbetriebskosten (TCO) für den Betrieb eines Brennstoffzellen-Lkw mit denen eines Diesel-Lkw im Laufe der Zeit vergleicht. Bei bestimmten politischen Unterstützungsmaßnahmen zeigt die Studie, wie sich die Kosten für den Betrieb eines Brennstoffzellen-Lkw in Richtung der Kosten für den Betrieb eines entsprechenden Diesel-Lkw entwickeln. Auf der anderen Seite werden Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEVs) laut einer neuen Analyse des zwischenstaatlichen Thinktanks „International Transport Forum“ (ITF) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) bei den Kosten nicht mit ihren direkt elektrifizierten Gegenstücken konkurrieren können.²⁰ Dabei gehen die höheren Lebensdauerkosten für FCEVs im Vergleich zu anderen Elektrofahrzeugen fast ausschließlich auf höhere Kraftstoffkosten zurück, die wiederum auf Energieverluste im Zusammenhang mit der Elektrolyse zurückzuführen sind, so das ITF in ihrem Bericht „Decarbonising Europe’s Trucks“.

3.8 Batterieelektrik

Im Umfeld der Messe IAA Transportation 2022 in Hannover war eine massive Werbung großer Hersteller von Lkw in den Medien zu beobachten, die überwiegend sehr optimistisch auf Schwere Lkw mit batterieelektrischem Antrieb blicken: MAN,

¹⁹ Vgl. H2Accelerate (2022): Analysis of cost of ownership and the policy support required to enable industrialisation of fuel cell trucks. Im Internet unter: <https://h2accelerate.eu/wp-content/uploads/2022/09/H2A-Truck-TCO-and-Policy-Support-Analysis-VFinal.pdf>

²⁰ Vgl. International Transport Forum (2022): Decarbonising Europe’s Trucks: How to Minimise Cost Uncertainty“, International Transport Forum Policy Papers, No. 107, OECD Publishing. Im Internet unter: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-europes-trucks-minimise-cost-uncertainty.pdf>.

der achtgrößte Truckhersteller der Welt, setzt für Schwere Lkw auf Batterieelektrik. Der Elektrofahrzeug-Hersteller Tesla lieferte vor kurzem seine ersten elektrischen Semi-Trucks aus. Daimler Truck, der mit Abstand weltweit größte Hersteller von Lkw ist davon überzeugt, dass sowohl Batterie- als auch Brennstoffzellentechnologien notwendig sein werden. Dieser Zugang widerspricht zunächst einmal intuitiven technischen Überlegungen, weil eine sehr große Batterie transportiert werden muss, was die Beladungskapazität des Lkw spürbar beeinträchtigt. Außerdem ist zu erwarten, dass das Aufladen dieser großen Batterien zu Problemen führen wird. Da ein Teil der Lkw große Wege über den europäischen Kontinent und darüber hinaus zurücklegt, stellt sich die Frage der Auflademöglichkeiten in besonderer Weise. Es spricht viel dafür, dass in vielen Staaten der EU, insbesondere im Süden, dies noch für Jahrzehnte in Breite nicht möglich sein wird.

Es ist auch davon auszugehen, dass die Netze in Deutschland von der Größe her weiter begrenzt sein werden und dass die Organisation rund um die Ladung der Batterien eine große Herausforderung darstellen wird. Mit der Batterieelektrik sind zudem neben Problemen bzgl. der Verwendung seltener Rohstoffe enorm viele Entsorgungsprobleme verbunden. Hinzu kommen geografisch und klimatisch bedingt Einflussfaktoren, die einen praktikablen Einsatz von Batterien in Lkw erschweren dürften. Batterien haben kürzere Reichweiten bei niedrigen Temperaturen und es entstehen Herausforderungen, wenn größere Steigungen bewältigt werden müssen. Im Extremfall führen größere Staus mit vielen Lkw bei niedrigen Temperaturen im Winter in den Alpen oder anderen Gebirgen zu Beeinträchtigungen des Gütertransports.

Die angesprochenen Themen führen in Summe dazu, dass Global Energy Solutions davon ausgeht, dass man als Spediteur Batterien in Schweren Lkw erst einmal nicht nutzen wird, außer, um mit einzelnen Exemplaren Erfahrungen zu sammeln,

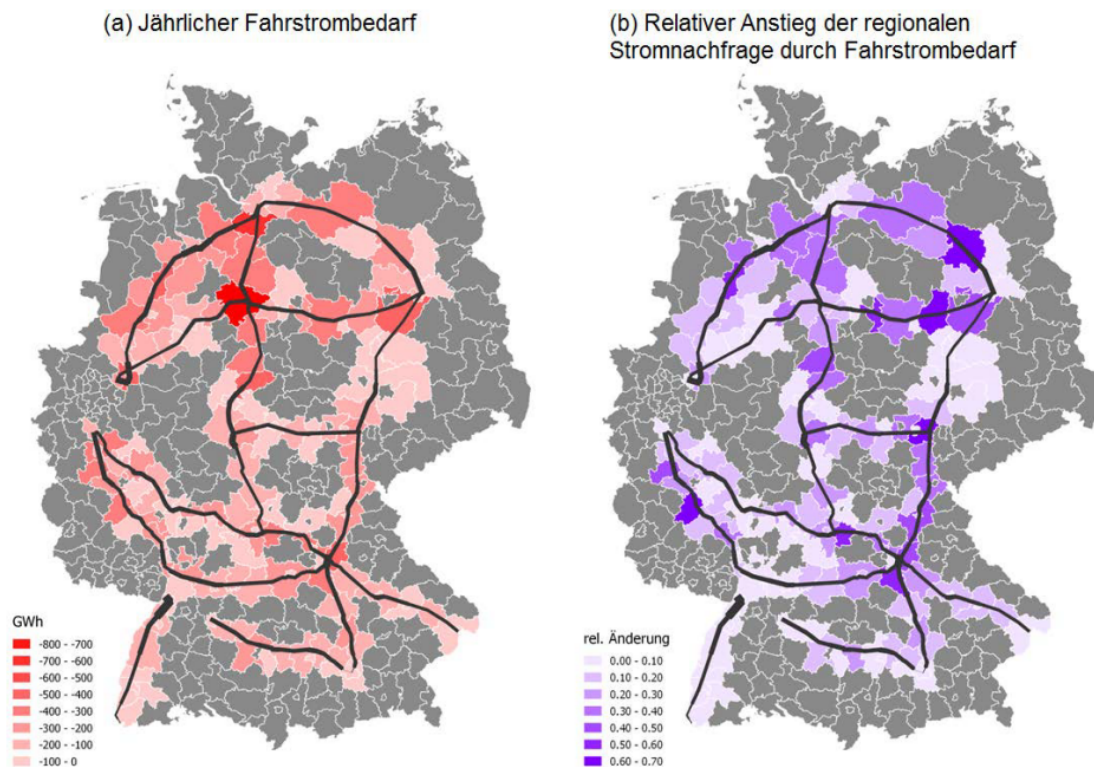
wie oben schon im Bereich der Brennstoffzellen oder Wasserstoffantriebe erwähnt wurde. So kann die Anschlussfähigkeit der Nutzer an die unterschiedlichen technologischen Entwicklungen gewährleistet werden. Außerdem erzeugt ein Fahrzeug mit unkonventionellen Antrieben für Aufsehen und erzielt Vorteile für den Bereich Marketing und Kommunikation. Daher empfiehlt Global Energy Solutions Speditionen, dass sie einen Wechsel zu batterieelektrischen Fahrzeugen hinauszögern und in Breite nur wechseln, wenn es zum gegebenen Zeitpunkt am Markt keine andere Lösung mehr geben sollte.

3.9 Strom aus Oberleitungen

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, hat der aktuelle Stand der batterieelektrischen Konzepte für den Antrieb Schwerer Lkw Schwächen, die z. B. die verhältnismäßig geringe Reichweite der Lkw aufgrund des großen Gewichts und der geringen Energiedichte der Batterien betreffen. Die Installation von Oberleitungen über hochfrequentierten Autobahnabschnitten soll dabei helfen, diese Probleme zu bewältigen. Lkw könnten bei einem leistungsfähigen Oberleitungssystem ihren Strom direkt beziehen und die in der Batterie gespeicherte Energie dann verwenden, wenn keine Oberleitungen vorhanden sind. Teststrecken gibt es in Deutschland z. B. an der A5 in Hessen und in Schleswig-Holstein.

Ein diskutiertes Szenario²¹ spricht von rund 4.000 km Elektrifizierung durch Oberleitungen auf 65 % der am häufigsten befahrenen Strecken in Deutschland mit dem Ziel, im Jahr 2040 etwa 9-12 Millionen Tonnen CO₂ einzusparen, was einer Reduktion von etwa einem Viertel der durch Schwere Lkw verursachten Emissionen entspricht. Verschiedene Studien sehen Kostenvorteile für diesen Ansatz.

²¹ Ebd.



Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut (Umlegung auf Einzelstrecken ohne Netzerhöhungen)

Abbildung 11: Darstellung des Fahrstrombedarfs für Oberleitungs-Lkw im Jahr 2050.²²

Allerdings hat sich bspw. in vom Bundesverband der Industrie beauftragten Studien zwischen den Jahren 2018-2021 die Bedeutung von Oberleitungs-Lkw von einem zentralen Element hin zu einer ergänzenden Maßnahme verändert.^{23, 24}

Während die genannten Studien betonen, dass die Investitionskosten für die Oberleitungs-Infrastruktur relativ gering seien, stellen andere Einschätzungen genau das Gegenteil fest.²⁵ Insbesondere erinnert das Konzept an den Gütertransport auf

²² Vgl. Ökoinstitut e.V. (2020). StratON – Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht. Im Internet unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf>

²³ Vgl. Boston Consulting Group (2018). Klimapfade für Deutschland. Im Internet unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>

²⁴ Vgl. Boston Consulting Group (2021). Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Im Internet unter: https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021_bdi_klimapfade_2.0_-_gesamtstudie_-_vorabve

²⁵ Vgl. Köllner, C. (2020) Pro und Contra Oberleitungs-Lkw. Im Internet unter: <https://www.springerprofessional.de/schwere-lkw/emissionen/pro-und-contra-oberleitungs-lkw/17781332>

dem Schienenweg. Auch hier können zwar große Distanzen zurückgelegt werden, wobei aber für die letzten Meilen auf eine andere Art des Transports bzw. beim Oberleitungs-Lkw auf eine andere Antriebsart umgestellt werden muss. Es sieht jedoch so aus, dass der Schienenverkehr im Vergleich zum Oberleitungs-Lkw eine bessere CO₂-Bilanz hat.²⁶

Das aus der Sicht von Global Energy Solutions wichtigste Argument gegen Oberleitungs-Lkw ist jedoch die Voraussetzung dafür, dass das System reibungsfrei funktioniert, die in allen Studien zwar erwähnt, jedoch nicht ausreichend detailliert diskutiert und hinterfragt wird: Ein leistungsfähiges Oberleitungssystem auf der Basis von erneuerbarem Strom. Außerdem sollte dieses natürlich möglichst in ganz Europa verfügbar sein und funktionieren. Weitere, größere Mengen an erneuerbarem Strom wären zu produzieren und dann bereitzustellen, wenn die Güter transportiert werden müssen. Die fragwürdige Realisierung dieser unterschiedlichen Komponenten in Kombination mit den vielen noch offenen Fragen lassen darauf schließen, dass diese Technologie (Oberleitungs-Lkw) in absehbarer Zeit keinen relevanten Einsatz finden wird.

4. Empfehlung für eine Doppelstrategie

Wir empfehlen daher Entscheidungsträgern bei der Neubeschaffung von Lkw eher bei den heutigen Kraftstoffen (ggf. alternativ Low-Carbon-Wasserstoff) zu bleiben und die Entwicklungen auf den unterschiedlichen Technologiepfaden zu verfolgen.

Der politische Wille und die daraus resultierende Regulierung zum Vorteil einzelner Technologieoptionen müssen nicht zwingend dazu führen, dass der ökonomisch effizienteste und gleichzeitig technologisch am besten machbare Weg gewählt

²⁶ Vgl. z. B. Die Güterbahnen (2019). Berlin muss Phantomdiskussion um Stromleitungen für schwere Lkw jetzt beenden. Im Internet unter: <https://die-gueterbahnen.com/news/berlin-muss-phantomdiskussion-um-strom-leitungen-fuer-schwere-lkw-jetzt-beenden.html>

wird. Dies insbesondere in Hinblick auf die Lösung des nur global lösbaren Klimaproblems.

Im Sinne der Erläuterungen des Kapitels 2 sollte immer dafür argumentiert werden, die effizienteste, technisch machbarste und weltweit ausrollbarste aller verfügbaren Optionen politisch umzusetzen. Innerhalb der aktuellen Diskussionen und bereits implementierten Regelwerke ist dies voraussichtlich häufig eine Position, die auf Widerstand treffen wird. Dennoch gilt es, den Diskurs in dem Maße in diese Richtung zu lenken, wie dies im Rahmen der Möglichkeiten der einzelnen Akteure geschehen kann. Die Bedeutung von Unternehmensverbänden ist hier nicht zu unterschätzen. Insbesondere wenn diese mit führenden Vertretern aus der Wissenschaft und Politik zusammenarbeiten und gemeinsame Argumentationslinien ausarbeiten und vertreten. Dies ist der eine Strang einer empfohlenen Doppelstrategie.

Der andere Strang erfordert es, dass man sich als Verband oder Unternehmen unter den aktuell herrschenden Rahmenbedingungen zurechtfindet und möglichst gut navigiert. Das bedeutet praktisch, dass man als Unternehmen einen Überblick über die technischen Entwicklungen der einzelnen Antriebstechnologien behält und vereinzelt Erfahrungen in der praktischen Nutzung neuer Technologien sammelt. Dabei kann man auf Erwartungen der Öffentlichkeit reagieren. Erfahrungen sollten ausgetauscht werden, z. B. innerhalb gemeinsamer Foren, die explizit für einen solchen Austausch geschaffen wurden. Aus den dort gewonnen Erkenntnissen können wiederum Argumente für den Strang Eins der Doppelstrategie entstehen.

Eine technologische Einschätzung auf dem Stand der aktuellen Diskussion lässt sich wie folgt zusammenfassen: In naher Zukunft wird voraussichtlich über die Batterieelektrik und die Bereitstellung von Strom über Oberleitungen keine tragfähige Lösung für die Klimaneutralität im Bereich Schwerer Lkw entstehen.

Man wird sich eher auf Gas, die Brennstoffzelle oder den Verbrennungsmotor unter Nutzung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen in der ein oder anderen Ausprägung konzentrieren. Damit ist man in der Lage, mit eigenem Kraftstoff großer Strecken zu überbrücken, um potenziell beliebig durch Europa fahren und überall handlungsfähig sein zu können.

Natürlich muss abgewartet werden, wie sich die Politik verhält. Die heutige Situation ist so zu sehen, dass aus dieser Richtung einzelne Technologiepfade regulatorisch ausgeschlossen werden. Entsprechende Vorgaben oder direkte Förderungen zugunsten einzelner Technologien verschieben die ökonomische Situation für die handelnden Akteure.

Jetzt liegt wiederum die **Investitionsentscheidung beim Spediteur**. Selbst wenn man den Spediteur dazu bringt, in die technologisch gewünschte Richtung zu investieren, wird sich voraussichtlich herausstellen, dass keine tragfähigen Lösungen entstehen, wenn die Voraussetzungen für finanzierbare und technisch praktikable Rahmenbedingungen nicht geschaffen werden, z. B. die europaweite Versorgung der Ökonomie mit ausreichend günstigem erneuerbarem Strom, der außerdem zuverlässig verfügbar ist.

Daher wird empfohlen, dass Speditionen im Moment **vorsichtig operieren**, sich nicht zu früh auf einzelne Technologien festlegen und nicht im umfangreichen Maße in technische Pfade investieren, die aktuell noch wesentliche, unbeantwortete Fragen aufweisen. Wie dargestellt, kann als Übergangslösung empfohlen werden, den Weg über HVO-Kraftstoffe zu testen bzw. zu verfolgen. Denn eine Verwertung der ohnehin anfallenden Altöle- und -fette bis zu deren mengenmäßigen Erschöpfung ist in jedem Fall sinnvoll und eine Maßnahme, die auch kurzfristig erfolgen kann.

Anhang

Das Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung, das von Herrn Prof. Dr. Dr. Dr. h.c. Franz Josef Radermacher geleitet wird, arbeitet eng mit Global Energy Solutions e. V. zusammen. Franz Josef Radermacher wurde im Jahr 2022 in den neugegründeten **Council of Engineers for the Energy Transition (CEET)** berufen. Dies ist ein Gremium, das dem Sekretariat des Generalsekretärs der Vereinten Nationen, Antonio Guterres, inhaltlich zu Fragestellungen der globalen Energiewende zuarbeitet. Vertreten wird Herr Radermacher in diesem Gremium immer wieder auch von Dr. Tobias Orthen vom FAW/n in Ulm, der die folgenden Überlegungen in den CEET eingebracht hat:

On "other clean fuels, including biofuels":

In the road sector, especially for medium and heavy duty vehicles a variety of low-carbon fuels play a role that we need to describe in addition to hydrogen fuel cells. Partly, there is an overlap with what has been written for the aviation sector. These include

- a) low-carbon methanol 1 (based on biomass, e.g. short rotation forestry like in Brasil or biological wastes),
- b) low-carbon methanol 2 (based on natural gas),
- c) low-carbon methanol 3 (e-methanol based on renewable energy and electrolysis),
- d) low-carbon diesel/kerosine/gasoline (based on gasification/fermentation of biomass),

e) low-carbon Hydrotreated Vegetable Oil (HVO diesel, especially as a short term option for emission reduction up to a level when wastes as fuel production input are used up)

Already today (fossil) methanol is regularly blended into fuel in China, from 15% (M15) to even 100% (M100) in some provinces. Replacing that methanol by low-carbon methanol can be applied quickly. We should have a paragraph on that as well under short term options.

In addition to hydrogen fuel cells also hydrogen combustion engines play a role where renewable energy is cheap, e.g. in parts of Africa, South America and China and hydrogen combustion engines are cheaper than fuel cells. This is important because of high interest rates on capital in the global south.

On road transport in general, we should add a paragraph on the global vehicle value chain. In Europe, truck fleets are replaced every 3-5 years. In total these vehicles have a lifetime of about 20 years. They are sold to other countries and often end their duty in Africa. African countries and technicians are facing the problem of always more complicated engine designs they need to learn to repair in order for these engines to be used.