

## Die Rolle von Kraftstoffen auf dem Weg zu klimaneutraler Mobilität



© Welt des Wissens, 2.5.2019

**Dr. Hans Jürgen Wernicke**  
**18.6.2024**

## 1) Status Quo und aktuelle Entwicklungen

Der weltweite Bestand an Kraftfahrzeugen beträgt über 1,6 Milliarden mit weiter zunehmender Tendenz. Allein 2022 wurden 85 Mio. Fahrzeuge neu produziert, davon die meisten in China (27 Mio.), gefolgt von den USA (10 Mio.), Japan, Indien, Südkorea und Deutschland (3,7 Mio.). Darin enthalten ist ein Bestand an LKW von 278 Mio. und eine Neuproduktion von ca. 24 Mio. (2022). Der Bestand an elektrisch betriebenen Fahrzeugen betrug 2022 27,7 Mio. (1,7 % des Gesamtbestands), in China allein 17,4 Mio.

Hinzu kommt eine Welthandelsflotte von ca. 100.000 Schiffen (über 100 BRZ) sowie ca. 27.000 größere Verkehrsflugzeuge. Wie in Abb. 1 gezeigt, sind fossile Treibstoffe im Transportsektor heute dominant <sup>1</sup>

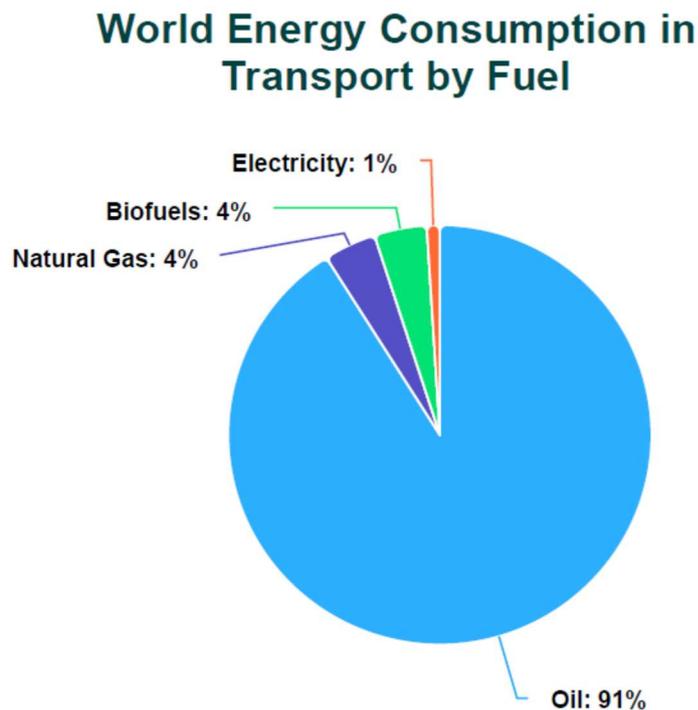


Abb. 1 Aufteilung des Energieverbrauchs im Transportsektor (2022) <sup>1</sup>

Dementsprechend wird auch der tägliche Erdöl-Verbrauch von ca. 98 Mio. Barrel (2022 OECD-Länder) dominiert vom Treibstoff-Verbrauch für den landgestützten Verkehr (49 %), Schiffen (3,2 %) und Flugzeugen (7,4 %).

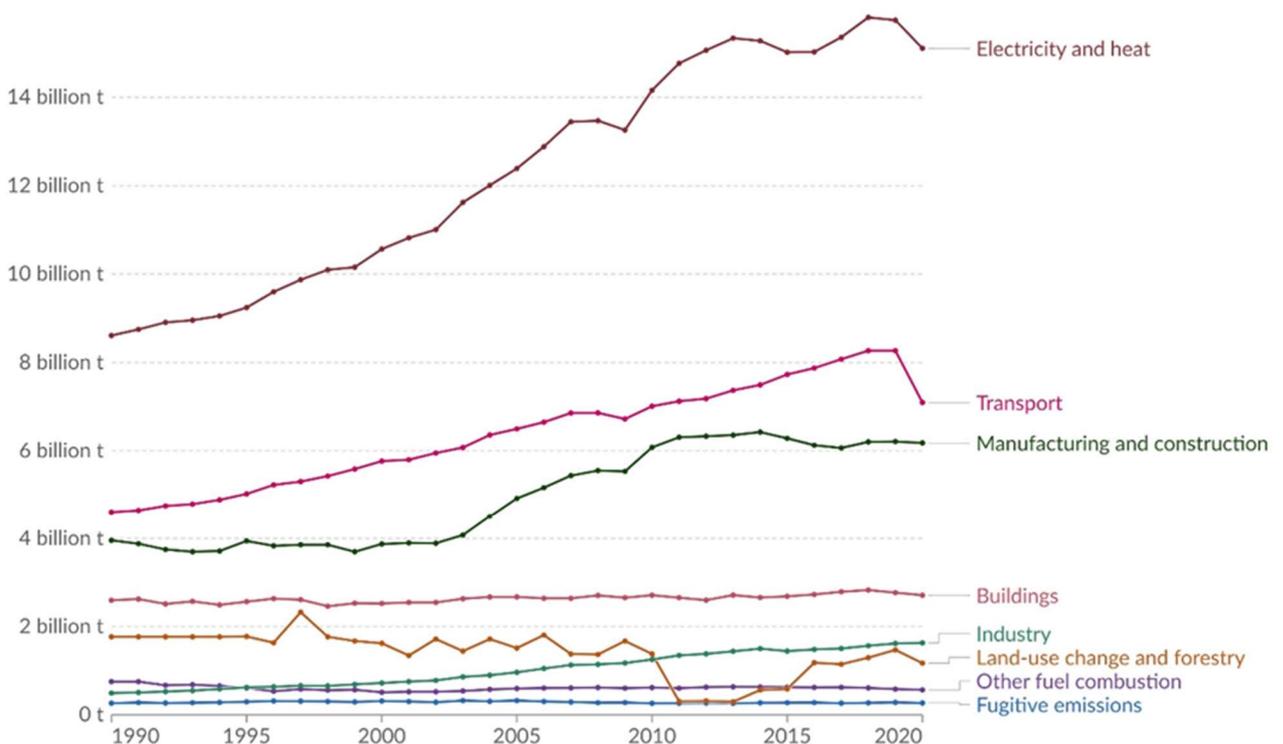
<sup>1</sup> Grafik entnommen aus: <https://www.stanford.edu/energy-services/energy-transportation>, accessed June 17,2024

Die verbleibenden ca. 40 % dienen der Erzeugung von chemischen Produkten, von Energie, im Gebäudesektor und der Landwirtschaft <sup>2</sup>.

Der Anteil des Transportsektors am Ölverbrauch könnte durch einen steigenden Anteil an Elektrofahrzeugen allmählich sinken. Eine McKinsey-Studie erwartet bis 2050 bei einem prognostizierten Anteil von 55 - 80 % eine Einsparung am Erdölverbrauch von 15 - 25 Mio. Barrel pro Tag <sup>3</sup>, unterstellt aber auch, dass Flug- und Schiffsverkehr weiterhin hauptsächlich auf fossile Treibstoffe angewiesen sind.

Der Transportsektor ist nach der Erzeugung von Strom und Wärme der zweitgrößte Emittent von CO<sub>2</sub> (und anderen Klimagasen), etwa 7 Gigatonnen CO<sub>2eq</sub> pro Jahr, vgl. hierzu die Abb. 2 <sup>4</sup>.

### CO<sub>2</sub> emissions by sector, World



Data source: Climate Watch (2023)

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

Abb.2: Weltweite CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Sektoren <sup>4</sup>

<sup>2</sup> <https://www.statista.com/statistics/307194/top-oil-consuming-sectors-worldwide/>, accessed June 17, 2024

<sup>3</sup> McKinsey-Studie "Global Energy Perspective 2023: Oil outlook", January 24, 2024

<sup>4</sup> Climate watch 2023, Our World in Data, accessed may 21, 2024

Der Großteil der Emissionen des Transportsektors wird – wie in Abb. 3 dargestellt – mit ca. 45 % durch den Personenverkehr (PKW, Busse, Zweiräder), ca. 29 % durch Frachtverkehr (LKW), weitere ca. 11 % durch Schiffe und ca. 12 % durch Flugzeuge verursacht. An den restlichen 4 % ist der Bahnverkehr mit nur ca. 1 % beteiligt.<sup>5</sup>

### Globale CO<sub>2</sub>-Emissionen im Transport



Quelle: Our World in Data, IEA, ICCT, 2018

Abb. 3: Verteilung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Transportsektoren<sup>5</sup>

Im Unterschied zu Punktquellen, bei denen durch „carbon capture“-Maßnahmen das CO<sub>2</sub> direkt aus den Abgasen entfernt werden kann, sind diese Emissionen diffus in der Atmosphäre verteilt und somit schwerer zu erfassen und zu vermindern.

Als Gegenmaßnahmen kommen daher nur die Verwendung von Treibstoffen mit geringer oder neutraler CO<sub>2</sub>-Bilanz, eine Kompensation der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch so genannte „Nature Based Solutions“ (NBS) und natürlich elektrische Antriebe (mit Brennstoffzellen oder mit Batteriespeichern mit reduzierter CO<sub>2</sub>-Emission bei ihrer Herstellung) infrage. Der Einsatz von NBS, z.B. in Form von Aufforstungs- oder Renaturierungsprogrammen, zielt auf eine CO<sub>2</sub>-Entfernung aus der Atmosphäre über Photosynthese und Bindung als Biomasse (carbon dioxide removal).

Aus diesen Zahlen wird die Größe der Herausforderung deutlich, die Treibhausgasemissionen aus dem Transportsektor nachhaltig zu senken und hierfür die richtige Kombination von Energieträgern und Antriebsarten im Rahmen einer „Multipfadstrategie“ für eine Dekarbonisierung zu finden.

<sup>5</sup> Grafik entnommen aus: <https://positionen.wienenergie.at/grafiken/emissionen-transport>, accessed may 23, 2024, H. Ritchie, „Cars; planes, trains: where do CO<sub>2</sub> emissions from transport come from?“ www. OurWorldInData.org, 6.10.2020.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Umstellung auf emissionsärmere Antriebe, insbesondere bei den langlebigeren LKW, Schiffen und auch Flugzeugen, aber auch bei PKW mehrere Dekaden erfordern wird. So würde es bei einer weltweiten jährlichen Produktionskapazität von 90 Mio. Fahrzeugen über 16 Jahre dauern, die gesamte Flotte auszutauschen und auf neue Antriebsformen umzustellen.<sup>6</sup>

Die Elektrifizierung wird einen wesentlichen, aber bei weitem nicht alleinigen Beitrag leisten können. Auch auf lange Sicht wird man auf Verbrenner in unterschiedlichen Ausprägungen und Einsatz von neuen, zum Teil synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels) nicht verzichten können.

E-Fuels sind synthetische Kraftstoffe, die mithilfe von grünem Strom erzeugt und in Verbrennungsmotoren genutzt werden können. In der Handhabung sind E-Fuels mit fossil erzeugten Kraftstoffen weitgehend kompatibel. Folglich kann man sie kostengünstig speichern und die für fossile Energieträger vorhandene Infrastruktur nutzen. Dazu zählen Pipelines, Tanker, Tankstellen, außerdem Flugzeuge, Schiffe und nicht zuletzt die weltweite Bestandsflotte an PKW und LKW.

Ein universeller Baustein jeder grünen Energiewende ist Wasserstoff, der emissionsfrei verbrannt werden kann. Allerdings ist die Verwendung als Kraftstoff technisch anspruchsvoll. Infrage kommen Druckspeicher bis zu 700 bar, heute bereits Stand der Technik. Etabliert ist auch die Speicherung von flüssigem Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) durch Abkühlung und Kondensierung bei - 253 °C mit dem Nachteil von Verdampfungsverlusten. Um Wasserstoff über weite Entfernungen zu transportieren, kommen allenfalls Pipelines oder Wasserstoffderivate wie Methanol, Ammoniak und sogenannte „Liquid Organic Hydrogen Carriers“ (LOHCs) infrage, aus denen durch Rückspaltung Wasserstoff gewonnen wird.

Eine globale Energiewende, bei der man „alles neu“ machen würde, ist letztlich jenseits aller Realität. Aus dem enormen Skalierungsbedarf ergeben sich für eine Umsetzung Probleme auf vielen Ebenen: Ressourcen (insbesondere kritische Batterierohstoffe bei der Elektrifizierung), Finanzierung, zusätzliche Infrastruktur, langfristige Festlegung auf einen zukünftigen Energiemix einschließlich seiner Verfügbarkeit, Alltagstauglichkeit und Kosten für den Nutzer, aber auch strategische und geopolitische Aspekte.

Dementsprechend unterschiedlich sind die Strategien einzelner Regionen vor allem für den straßengebundenen Transport.

Die USA haben ihren „Antriebswende“-Plan, bis 2032 den Anteil verkaufter Elektro- und Hybrid- PKW auf 2/3 zu steigern, zeitlich gestreckt.

China, ursprünglich Vorreiter der Elektromobilität, exportiert Elektroautos verstärkt in den europäischen Markt, verfolgt aber parallel dazu die Weiterentwicklung von Verbrennungsfahrzeugen mit neuer Motorentechnik für synthetische bzw. biobasierte

---

<sup>6</sup> s.a. Interview mit S.Hartung, CEO Bosch, 3.3.24

Kraftstoffe. Strategisch könnte China dadurch technologisch dominant für beide Antriebsformen werden.

Die EU ist die einzige Region, die auf eine einzige Technologie setzt und in der nach aktueller Planung ab 2035 nur noch Fahrzeuge verkauft werden dürfen, die kein CO<sub>2</sub> mehr ausstoßen, gemeint ist eine Umstellung auf „All-Electric“ und ein Ende des Verbrenners. Allerdings soll diese Vorgabe 2026 überprüft werden. Zudem durchkreuzt die Streichung von staatlichen Subventionen den ursprünglich gewünschten schnellen Hochlauf von Elektrofahrzeugen.

So wird sich bei PKW die weitere weltweite Entwicklung auf eine Koexistenz verschiedener Antriebsformen einpendeln, die aus elektrischen, Wasserstoff-basierten, nachhaltigen Verbrenner-Kraftstoffen sowie Hybridlösungen bestehen wird.

Eine Quantifizierung dieser Entwicklung ist schwierig, beispielhaft eine Prognose in Abb. 4, die einen beständigen Verbrenneranteil an der PKW-Produktion von 25 – 30 % bis 2040 voraussagt.<sup>7</sup> Ähnlich wird sich auch eine Verteilung der Antriebsformen bei den LKW einstellen.

Bei Schiffen hat man längst begonnen, den Einsatz von Schweröl zurückzudrängen, schwefelärmeren Marinediesel in küstennahen Zonen einzusetzen und Abgasreinigungsanlagen einzubauen.

Neben regulatorischen Maßnahmen wie der Einführung von „Emission Control Areas (ECA's)“ durch die Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (IMO) sollen die Treibhausgasemissionen "unter Berücksichtigung der unterschiedlichen nationalen Gegebenheiten „bis zum Jahr 2050 oder kurz danach“ auf Null sinken.

Als Zwischenziel haben die 175 IMO-Mitgliedsstaaten vereinbart, bis 2030 die Emissionen im Vergleich zum Referenzjahr 2008 um mindestens 20 %, bis 2040 um mindestens 70 % zu senken.

Erfolgversprechende Kandidaten für zukünftige Schiffstreibstoffe sind Flüssiggas (LNG), Methanol und Ammoniak, langfristig auch verflüssigter Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) – entweder als Verbrennungsantrieb oder auch in Kombination mit Brennstoffzellen. Auf jeden Fall sind die Motoren für jeden dieser Treibstoffe unterschiedlich, was von Herstellern und Anwendern schwierige strategische Entscheidungen verlangt.

Der Flugverkehr erzeugt aktuell CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Größenordnung von jährlich fast einer Gigatonne CO<sub>2</sub>. Hinzu kommen Emissionen von Stickoxiden, Rußpartikel und andere Einflüsse, z.B. durch gebildete Aerosole. Die internationale Luftfahrt hat

---

<sup>7</sup> <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1244924/umfrage/pkw-absatz-weltweit-nach-antrieb>, accessed may 23., 2024

Schätzungen zufolge damit einen Anteil von ca. 3,5 bis 5 % an der anthropogenen Erwärmung,<sup>8</sup> wobei etwa 1/3 den CO<sub>2</sub>-Emissionen und 2/3 anderen Klimaeffekten zugeordnet werden.<sup>9</sup>

08.05.24, 14:54

Pkw-Absatz weltweit nach Antrieb bis 2040 | Statista

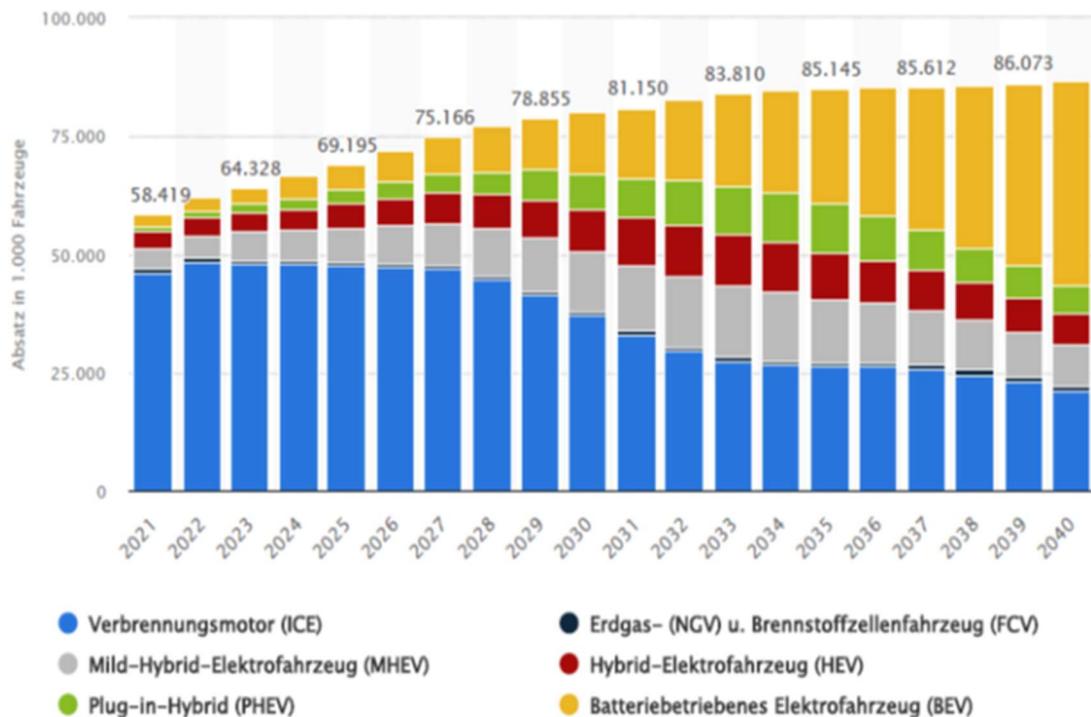


Abb. 4: Prognose der PKW-Produktion weltweit nach Antriebsform<sup>7</sup>

Um die Emissionen trotz weiterhin zunehmendem Flugverkehr zu reduzieren, liegt der Schwerpunkt der weiteren Entwicklung auf dem Einsatz biobasierter Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels – SAF) als drop-in Ersatz für fossiles Kerosin, langfristig aber auch auf alternativen Antrieben. Problem ist die begrenzte Verfügbarkeit dieser Treibstoffe bei stark steigendem Bedarf.

Eine Beimischung von Sustainable Aviation Fuels zu konventionellem Flugtreibstoff bringt eine sofortige Entlastung für das Klima.

Dementsprechend fordert das EU-Parlament bis 2025 zunächst eine SAF-Quote von 2 % und bis 2050 sogar von 85 %.

<sup>8</sup> Innovative Antriebe und Kraftstoffe für einen klimaverträglicheren Luftverkehr, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, 8. Mai 2024

<sup>9</sup> D.S. Lee et al, Atmos Environ (1994). 2021 Jan 1; published online 2020 Sep 3.

Am 28.11.2023 fand ein erster Transatlantikflug mit einem Passagierflugzeug der Virgin Atlantic statt, das von 100 % Sustainable Aviation Fuel angetrieben wurde. Er bestand aus einer Mischung von 88 % hydriertem Abfallfett („HEFA“, ähnlich dem derzeit auf dem Markt eingeführtem HVO-Diesel) und zu 12 % aus einer Aromatenmischung („SAK“), die aus Zuckern gewonnen wird.

## **2. Antriebsoptionen im Detail**

### **2.1. Kraftfahrzeuge**

Es ist eine kontroverse, politische Diskussion, ob in der EU am Verbot festgehalten werden soll, ab 2035 nur noch solche Neuwagen zuzulassen, die „beim Fahren CO<sub>2</sub>-emissionsfrei sind“ (wobei der gesamte CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bei der Herstellung vor allem der Batteriespeicher sowie der begrenzten Verfügbarkeit „grünem“ Stroms für den Betrieb ignoriert wird).

Eine „all-electric“-Strategie mag in Europa, generell in dicht besiedelten Gebieten und Großstädten weltweit möglich und sinnvoll sein, auf andere Antriebsformen wird man aber auf keinen Fall verzichten können.

Neben Lücken in der Infrastruktur, der Versorgung mit regenerativ erzeugtem Strom sind auch weitere Limitierungen zu beachten, unter anderem die begrenzte Verfügbarkeit kostbarer Rohstoffe, die Auswirkungen ihres Abbaus auf die Natur und nicht zuletzt neue, geopolitische Abhängigkeiten bei der Versorgung. In einer Studie der Internationalen Energie Agentur (IEA) zeigt Abb. 5 den spezifischen Bedarf der verschiedenen Anwendungsbereiche <sup>10</sup>.

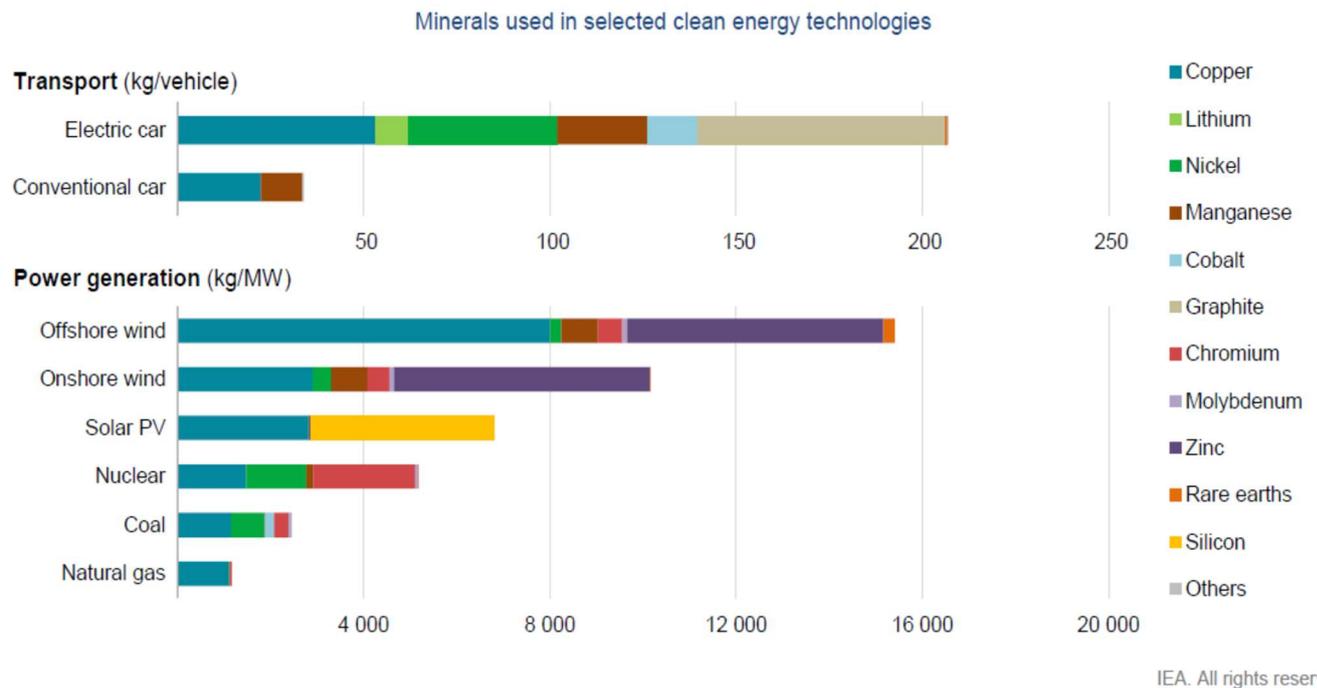
Für den prognostizierten Rohstoffbedarf beim Ausbau der Elektromobilität und gleichzeitig der Stromerzeugung erwartet die IEA eine Vervierfachung des Bedarfs an kritischen Mineralien bis 2040. Eine weltweite Klimaneutralität 2050 („net-zero“) würde sogar eine Versechsfachung dieses Bedarfs bedeuten

Allein für Elektrofahrzeuge und Batteriespeicher steigt der Lithiumbedarf bis 2040 auf das 40fache, der von Kobalt und Nickel auf das 20 - 25 fache und der von Kupfer für Stromleitungen verdoppelt sich.

---

<sup>10</sup> World Energy Special Outlook Report, “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions”, IEA, revised version March 2022,

## Die Rolle von Kraftstoffen auf dem Weg zu klimaneutraler Mobilität



Notes: kg = kilogramme; MW = megawatt. Steel and aluminium not included. See Chapter 1 and Annex for details on the assumptions and methodologies.

Abb. 5 Spezifischer Mineralienbedarf im Bereich Elektromobilität und Stromerzeugung<sup>10</sup>.

Je nach Ausbauszenario und der identifizierten und vermuteten Rohstoffreserven ist mit Engpässen vor allem bei Kobalt, Nickel und Seltenen Erden (Neodym, Disprosium) zu rechnen.

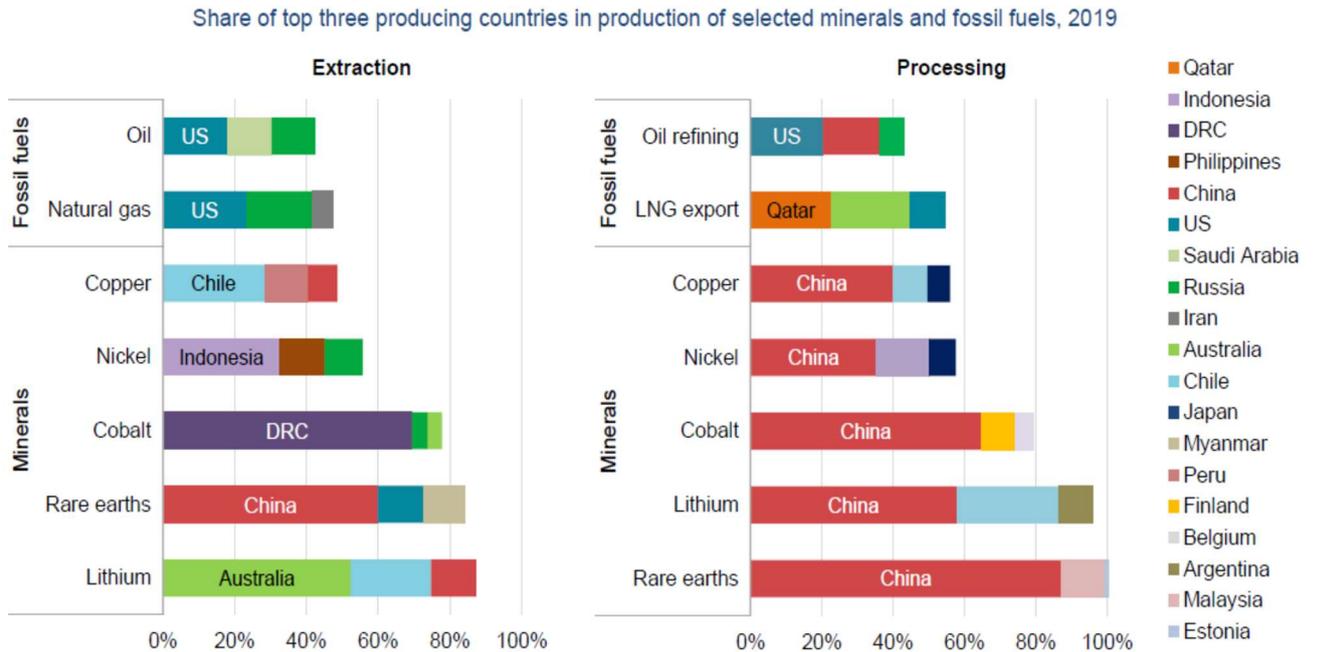
Die geopolitischen Abhängigkeiten von einigen wenigen Ländern sind hierbei erheblich, wie in der IEA-Studie gezeigt wird, siehe Abb. 6 für das Jahr 2019<sup>10</sup>.

Neben dem batterieelektrischen Antrieb und der mit (grünem)Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle sind Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff, Dimethylether (DME), Methan (und Biomethan), Methanol (und methanolbasiert Benzin, Diesel, Oxymethylenether), Fischer-Tropsch Kraftstoffe sowie biogene Kraftstoffe wie z.B. Ethanol, HEFE bzw. HVO mögliche Optionen.

Alle genannten Verbrennungskraftstoffe basieren auf großtechnisch eingesetzten Herstellungsverfahren und sind auch als Kraftstoff weitgehend erprobt. Einige Kraftstoffe erfordern geringfügige Anpassungen der Motoren. Alle führen zu einer deutlich saubereren Verbrennung und Verminderung der Emissionen.

Der Ausbau der Produktionskapazitäten bzw. die Anpassung der Raffineriestrukturen könnte im Rahmen einer allmählichen Erhöhung von Beimischungsquoten zu konventionellen Kraftstoffen erfolgen: Biogas zu Erdgas (CNG), DME zu LPG,

Methanol zu Benzin (M10-M100), Methanolderivate, Fischer-Tropsch-Kraftstoffe, Ethanol (E5-E100) und HVO zu fossilem Benzin bzw. Diesel.



IEA. All rights reserved.

Notes: LNG = liquefied natural gas; US = United States. The values for copper processing are for refining operations. Sources: IEA (2020a); USGS (2021), World Bureau of Metal Statistics (2020); Adamas Intelligence (2020).

Abb. 6 Geopolitische Abhängigkeiten bei kritischen Mineralien <sup>10</sup>

### 2.1.1. Beispiel Methanol

Methanol wird heute noch weitgehend fossil erzeugt mit einer Jahresproduktion von derzeit ca. 110 Mio. Tonnen. 30 % der weltweiten Methanolproduktion werden bereits als Kraftstoff verwendet, zumeist als Additiv zur Oktanzahlsteigerung in Form von MTBE/TAME und in Biodiesel (Fettsäuremethylester) der 1. Generation.

Als hochoktanige Blending-Komponente (ROZ-Oktanzahl 110) wird Methanol zumeist in geringer Menge (< 3 Vol.-%) konventionellem Kraftstoff zugemischt, in einigen Ländern (insbesondere in China) auch in höherer Konzentration als M15-M60-, M85 oder sogar als M100-Kraftstoff, allerdings ist diese noch auf fossiler Basis produziert, vgl. Abb. 7.

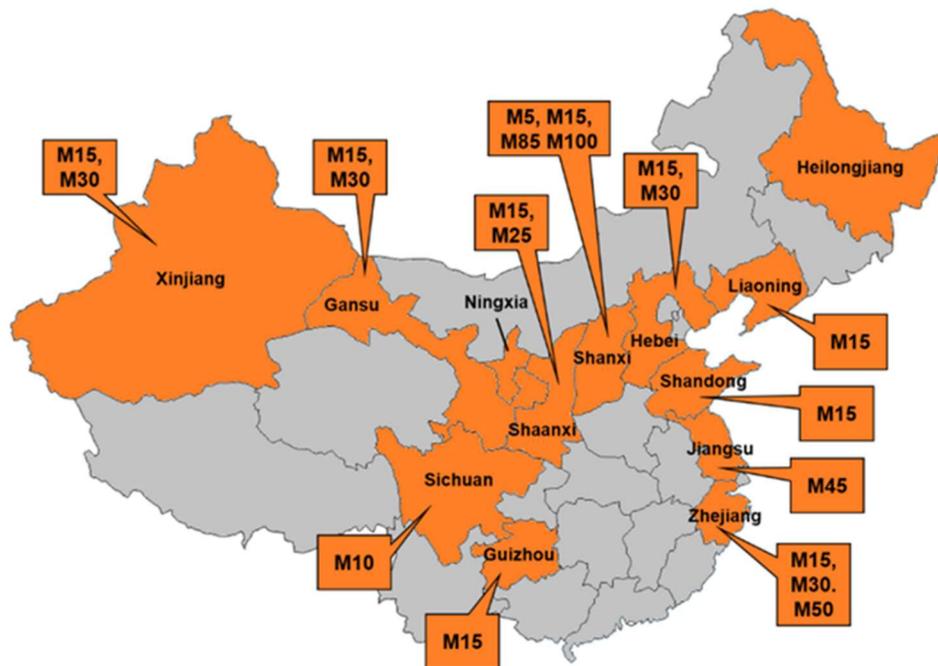


Abb. 7 Methanolbeimischungsquoten in China <sup>11 12</sup>

Der Bestand an rein methanolangetriebenen Fahrzeugen in China liegt derzeit bei nur ca. 30.000 Einheiten, geplant ist ein deutlicher Zuwachs in den kommenden Jahren, zunächst vor allem bei Taxis, Bussen und Regierungsfahrzeugen und im Rahmen einer allmählichen Umstellung von Kohle-basiertem auf „grünes“ Methanol und einem Ausbau des Tankstellennetzes (nur 200 Tankstellen verfügen derzeit über M100). <sup>11 12</sup>

Wie in Abb. 8 schematisch dargestellt, ist Methanol Basis für eine Serie von Derivaten, die als Kraftstoffe verwendet werden können, aber zusätzliche Verarbeitungsschritte sowie zum Teil logistische sowie motorische Vorkehrungen erfordern. Die Mehrzahl dieser Optionen führt zu besseren Wirkungsgraden bei der Verbrennung und Verbesserung der Abgasemissionen.

Für Methanol selbst gibt es eine Vielzahl von Produktionsalternativen, die im Vergleich zu den konventionellen, fossil basierten Routen zu geringeren oder keinen Netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen führen.

<sup>11</sup> Z. Yang, "China is betting big on another gas engine alternative: methanol cars", MIT Technology Review Sept 30, 2022

<sup>12</sup> C. Li et al, „Methanol Vehicles in China, a review from a Policy Perspective“, Sustainability 15, 9201 (2023)

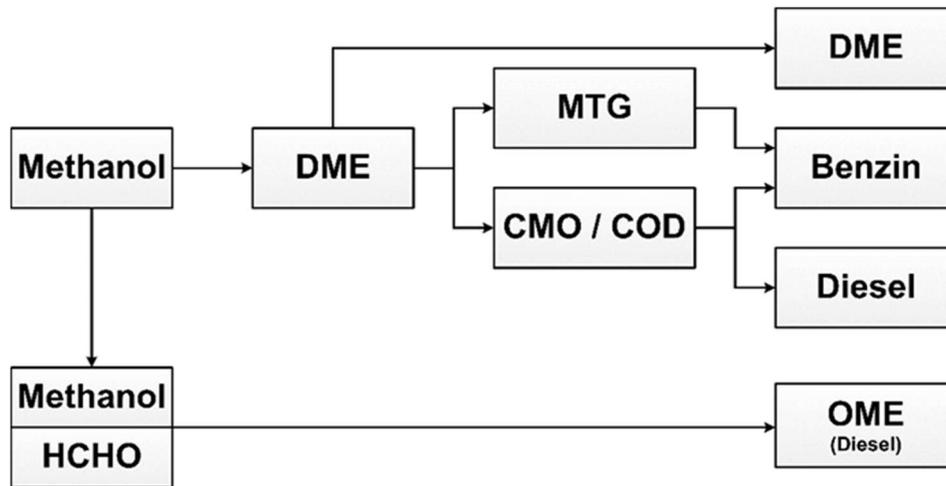


Abb. 8: Methanolderivate zur Verwendung in Kraftstoffen <sup>13</sup>

(HCHO: Formaldehyd zur OME-Herstellung; OME: Oxymethylenether-Diesel; DME: Dimethylether (Diesel); MTG: Methanolbenzin; CMO/COD: Methanoldiesel)

Neben den biogenen Routen bietet sich – wenigstens in einer Übergangsphase - auch die Möglichkeit an, Methanol aus Erdgas in Kombination mit einer CO<sub>2</sub> Abscheidung (CCS – carbon capture and storage) zur erzeugen. Eine schematische Übersicht der Produktionswege zeigt Abb. 9:<sup>14</sup>

„Grünes“ Methanol wird gewonnen aus Wasserstoff und CO<sub>2</sub>. Das zur Synthese verwendete CO<sub>2</sub> entstammt entweder Punktquellen durch Abscheidung aus stationären Abgasen („Carbon Capture and Usage – CCU) oder auch durch sehr viel aufwendigere Abscheidung aus der Luft („Direct Air capture“- DAC).

Eine erste Anlage zur Synthese von Methanol aus CO<sub>2</sub> wurde bereits 2012 in Island mit einer Kapazität von 4.500 t/a, eine weitere wurde 2022 mit einer Kapazität von 110.000 t/a in Anyang in China in Betrieb genommen. Beide Anlagen basieren auf der Technologie der isländischen CRI Int.<sup>15</sup> Im Chemiepark Leuna startete im November 2023 eine Demonstrationsanlage auf Basis von Elektrolyse-Wasserstoff, der mit erneuerbarem Strom erzeugt wird, und CO<sub>2</sub>, welches zunächst über einen RWGS<sup>16</sup> zu CO konvertiert wird und eine effizientere Methanolsynthese erlaubt.<sup>17</sup>

<sup>13</sup> Entnommen aus: W.Maus (Hrsg) „Zukünftige Kraftstoffe“, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer 2019

<sup>14</sup> C.Marquez et al, “Marine methanol- future-proof shipping fuel”, Methanol Institute, May 2023

<sup>15</sup> <https://carbonrecycling.com/about/news/first-large-scale-co2-to-methanol-plant-inaugurated>, accessed may 23, 2024

<sup>16</sup> RWGS = reverse water gas shift

<sup>17</sup> <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemittelungen/2023/gruenes-methanol-pilotanlage>, accessed may 23, 2024

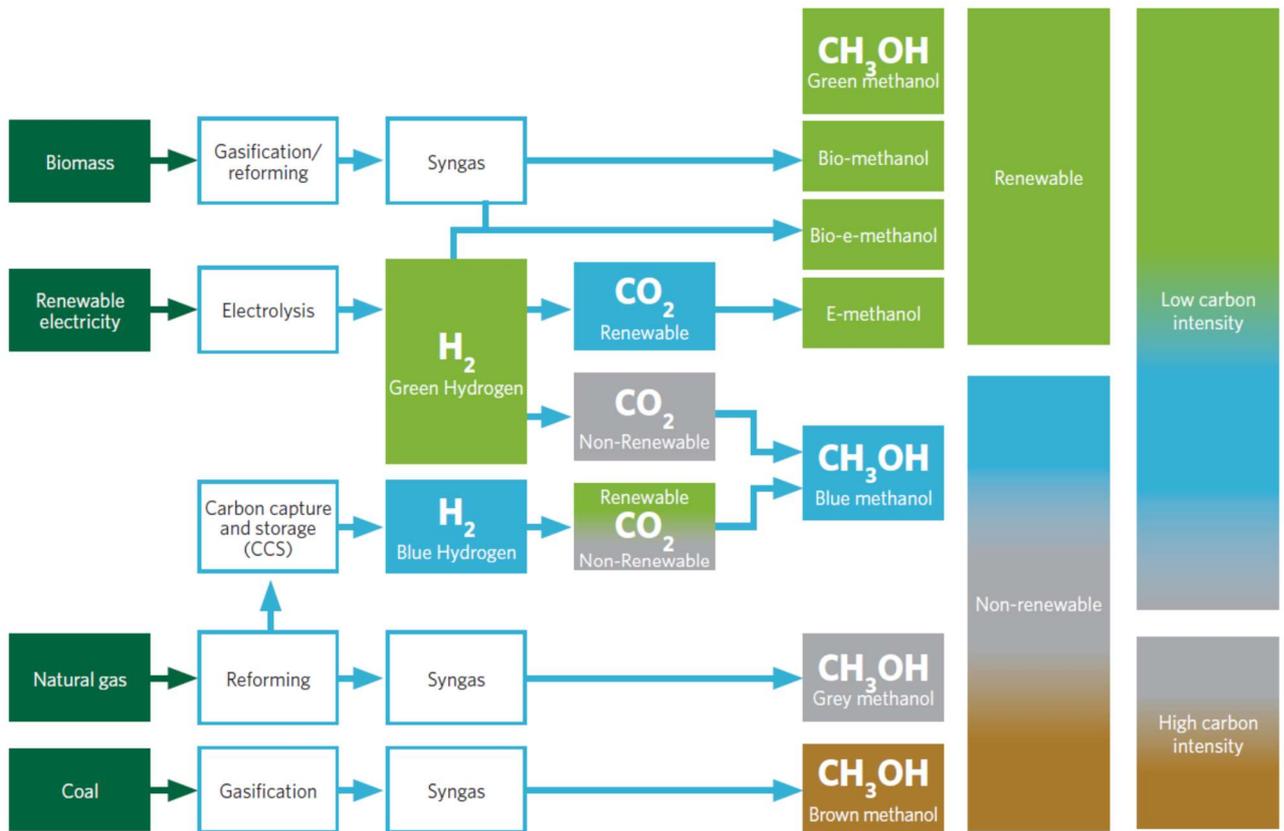


Abb.9 Syntheserouten für Methanol<sup>14</sup>

Um Methanol klimaneutral zu stellen, muss das zur Herstellung verwendete und bei der Verbrennung wieder freigesetzte CO<sub>2</sub> entweder aus biogenen Quellen stammen oder im Kreislauf geführt werden. Allerdings scheidet die diffuse CO<sub>2</sub>-Emission im Mobilitätsbereich für eine Kreislaufbildung aus. Immerhin ist die Mehrfachnutzung von CO<sub>2</sub> nach Abtrennung aus einer fossil betriebenen Punktquelle und Verwendung für methanolbasierten Kraftstoff ein emissionsmindernder Zwischenschritt.

Von den derzeit jährlich etwas über 110 Mio. Tonnen produziertem Methanol sind rund 200.000 Tonnen (0,2 %) „grünes“ Methanol. Dieses Verhältnis soll sich nach einer Prognose der IRENA in den nächsten Dekaden umkehren. Danach sollen im Jahr 2050 rund 500 Millionen Tonnen Methanol produziert, also rund fünf Mal mehr als noch im Jahr 2020.

Davon sollen 385 Millionen Tonnen (78 Prozent) Bio- oder E-Methanol sein, und nur noch 115 Mio. Tonnen auf fossiler Basis produziert werden, Abb.10.<sup>18</sup>

Während fossiles Methanol aus Erdgas gewonnen wird, sind bei E-Methanol Wasserstoff aus erneuerbaren Energien und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) die Hauptbestandteile. Bei Bio-Methanol ist es Biomasse, zum Beispiel aus Forstabfällen

<sup>18</sup> "Renewable Methanol", International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi 2021

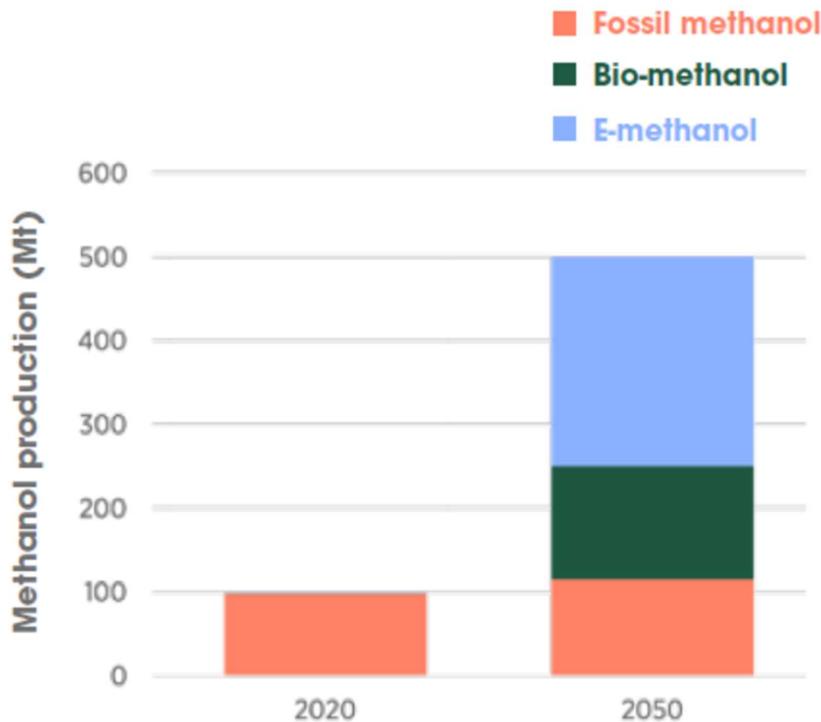


Abb.10 Prognostizierte Produktionsmengen für „grünes“ Methanol in 2050 im Vergleich zu 2020 (IRENA-Studie 2021 <sup>18</sup>)

Die Produktionskosten für „grünes“ Methanol sind auch bei einer unterstellten zukünftigen Kostendegression deutlich höher als für fossil (aus Erdgas) hergestelltes Methanol. Letztere liegen derzeit bei ca. 200 - 230 €/Tonne. Die Bandbreiten der Produktionskosten für e-Methanol liegen je nach heutigen Randbedingungen (Kosten für Elektrolysewasserstoff etc.) eher bei 400 - 600 €/Tonne, die für Bio-Methanol bei 300 - 1000 €/Tonne.

### 2.1.2. Beispiel HVO (HEFA) <sup>19</sup>

HVO ist ein Dieselkraftstoff, der durch Hydrierung biogener Öle, hauptsächlich von pflanzlichen und tierischen Altölen und -fetten hergestellt wird. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sinken um mehr als 90 %, bei Verwendung von regenerativ hergestelltem Wasserstoff zur Hydrierung ist der Kraftstoff CO<sub>2</sub>-neutral.

Die günstigen Eigenschaften von HVO beruhen auf dem hohen Gehalt langkettiger paraffinischer, einem nur geringen Anteil an naphthenischer Kohlenwasserstoffe. HVO ist aromaten- und schwefelfrei.

<sup>19</sup> HEFE: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids; HVO: Hydroprocessed Vegetable Oil)

Bezeichnend für die hohe Qualität von HVO (und GTL-Diesel) ist die hohe Cetanzahl als Indikator für die Zündwilligkeit des Treibstoffs.

Die Herstellungskosten von HVO hängen stark von den eingesetzten Rohstoffen ab und liegen bei der Verwendung von Rest- und Abfallstoffen wie Altölen und -fetten derzeit noch über denen von fossilem Diesel. Durch Kostendegression und Entfall der steigenden CO<sub>2</sub>-Bepreisung werden sich jedoch die Preise von HVO und fossilem Diesel annähern.

Die prinzipiellen Herstellungswege für HVO zeigt Abb. 11 <sup>20</sup>

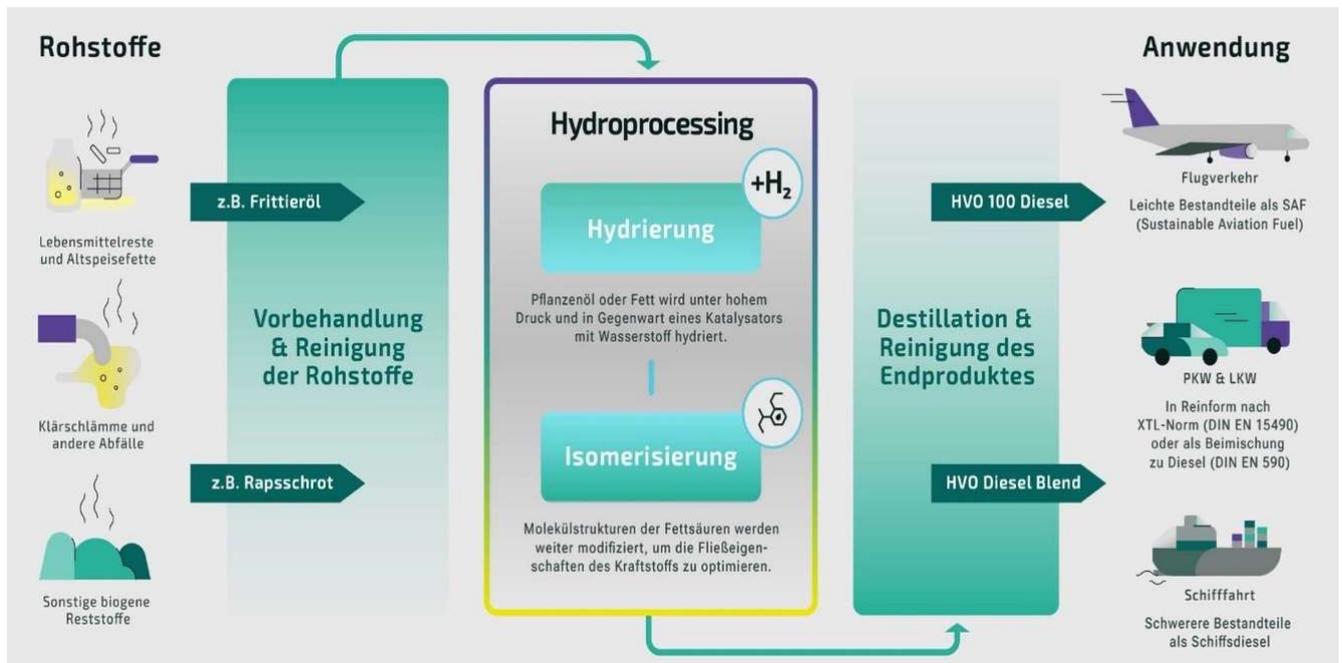


Abb. 11 Herstellungswege für HVO <sup>20</sup>

HVO aus Altspisefetten und Altölen mit bis zu 90 % CO<sub>2</sub>-Ersparnis kostet in Deutschland pro Liter rund 17 Cent mehr, HVO aus Palmölmühlenabfall mit etwa 65 % CO<sub>2</sub>-Reduktion liegt bereits heute etwa auf Dieselpreisniveau <sup>21</sup>

Die HVO-Produktion im Jahr 2020 belief sich auf 6,2 Mio. Tonnen weltweit mit den Schwerpunkten Europa (3,4 Mio. Tonnen) und USA (2,1 Mio. Tonnen). Die Kapazität im Jahr 2020 betrug 7 Mio. Tonnen, diese soll sich durch bereits in Bau befindliche Anlagen bis 2025 mehr als vervierfachen, vor allem in den USA mit

<sup>20</sup> entnommen aus: <https://efuel-today.com/herstellung-von-hvo>, accessed June 17, 2024

<sup>21</sup> <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/faq-zu-hvo-100>, 10.4.2024, accessed 17 June 2024

prognostizierten 12,6 Mio. Tonnen/Jahr und mit 11,3 Mio. Tonnen/Jahr in Europa, vgl. Abb. 12 <sup>22</sup>.

Größtes Projekt ist der Umbau einer Erdöl-Raffinerie der Phillips 66 in eine HVO-Raffinerie in Kalifornien mit einer Kapazität von 2,5 Mio. Tonnen/Jahr ab 2023.

In Europa dominieren bisher zwei Anlagen der Neste (in Finnland und den Niederlanden) mit 1,5 Mio. Tonnen Jahreskapazität sowie Anlagen der ENI, Gela sowie ENI, Porto Maghera in Italien (0,7 Mio. + 0,24 Mio. Tonnen) und der TOTAL, La Mède in Frankreich (0,5 Mio. Tonnen) den Markt.

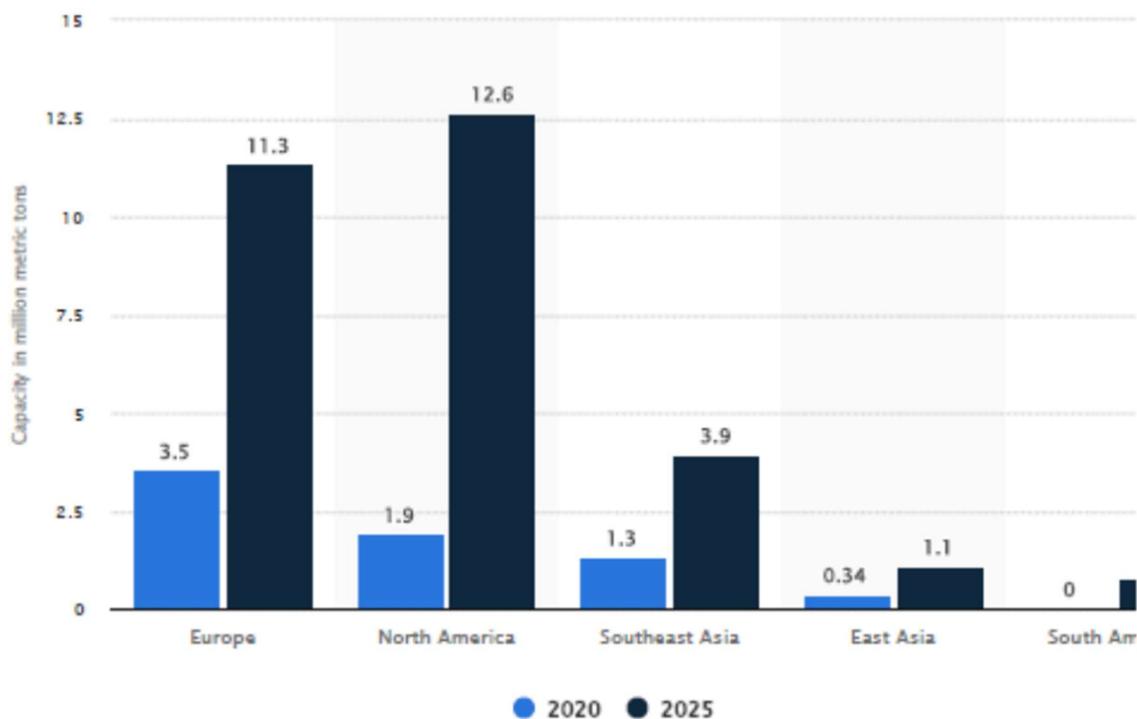


Abb. 12 Weltweite HVO-Produktionskapazität 2020, Prognose für 2025 <sup>22</sup>

Im Zeitraum bis 2025 plant u.a. UPM eine Anlage in Kotka, Finnland (0,5 Mio. Tonnen pro Jahr), St1 0,1 Mio. Tonnen pro Jahr in Göteborg und Preem, 1,3 Mio. Tonnen pro Jahr in Lysekil und Götheborg in Schweden. Weitere Anlagen sollen bei PKN, Plock/Polen und in Litvinov, Tschechien entstehen.

HVO kann in jedem Verhältnis konventionellem Diesel zugemischt oder als HVO 100 in reiner Form verwendet werden. Vor allem in Skandinavien, aber auch in den Niederlanden, Italien und Österreich wird HVO an über 11000 Tankstellen

<sup>22</sup> Statista, „HVO Global HVO biodiesel capacity worldwide in 2020 with forecast 2025, accessed May24, 2024

angeboten, seit Anfang 2024 auch in Deutschland mit der Bezeichnung XTL-Paraffinischer Diesel.

Die Verwendung von HVO als Diesel konkurriert mit seiner Verwendung als Hauptkomponente in biogenem Kerosin im Flugverkehr (SAF – sustainable air fuels).

Weltweit wurden 2021 213 Mio. Tonnen Pflanzenöle produziert. Der größte Anteil wurde nach Gebrauch entweder thermisch verwertet, zu (konventionellem) Biodiesel verarbeitet und zum geringeren Teil auch in der Oleochemie (für Detergentien) und zur Futtermittelproduktion verwendet.

Ein Treiber für die verstärkte Nutzung von HVO auf Basis von Altölen und -fetten anstelle von Biodiesel ist die in die Kritik geratene und daher abnehmende Verwendung von importiertem Palmöl aus Südostasien zur Herstellung von Biodiesel der 1. Generation (Fettsäuremethylester - RME, FAME). Dem soll durch ein Zertifizierungssystem begegnet werden.

Der weltweite Markt für gebrauchte pflanzliche Öle und Fette ist wenig transparent, so dass ein verfügbares Potential für HVO nur sehr grob auf jährlich 50 - 80 Mio. Tonnen geschätzt werden kann. Dies entspräche einem Potential von ca. 5 - 10 % des derzeitigen Diesel- oder ca. 10 - 15% des derzeitigen Kerosinverbrauchs weltweit.

In Bezug auf synthetischen Flugkraftstoff (SAF) ist diese Schätzung konsistent mit einer Bedarfsschätzung für 2022 von ca. 70 Mio. Tonnen SAF, wobei dieser wegen nicht ausreichend verfügbarer Produktionskapazität nur zum Teil aus HVO und ansonsten aus technischen Gründen auch aus anderen biogenen Quellen wie Stärke/Zucker stammt (z.B. „alcohols to jet“).

In Deutschland wurden im Jahr 2021 ca. 27 Mio. Tonnen Diesel verbraucht, weltweit waren es ca. 800 Mio. Tonnen. Bezogen auf den Gesamtmarkt ist der Beitrag von HVO mit knapp 30 Mio. Tonnen weltweit (das ist die existente und in Bau befindliche Kapazität 2025) noch gering.

Langfristig ergeben sich zusätzliche Potentiale unter anderem aus der Aufbereitung von (organischen) Abfällen und dem Anbau von Ölpflanzen und der Hydrierung (und auch Umesterung) der gewonnenen Öle, die nicht in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion stehen.

Beispiel ist die auf kargsten Böden wachsende Jatropha pflanze<sup>23</sup>, wobei der Flächenertrag bisher noch nicht für eine breite Einführung ausreicht.

Es gibt eine Vielzahl von alternativen Ölpflanzen, Neuzüchtungen bis hin zu Algen,

---

<sup>23</sup> M.H.Hussain, "Production of hydroprocessed renewable diesel from Jatropha oil and evaluation of its properties", Materials Today, Vol.72 (3) 1420 (2023)  
Author links open overlay panelMohd Hamid Hussain, C.H. Biradar

die als zukünftiger Rohstoff für nichtfossilen Diesel (und Kerosin) infrage kommen<sup>24 25</sup>.

### 2.1.3. Vergleich der Emissionen von Fahrzeugen

Die alleinige Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen während des Fahrbetriebs erfasst nur einen Teil der Emissionen einer Antriebsart. Betrachtet man den gesamten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für den Bau und die Nutzung von Verbrennern im Vergleich zu rein elektrisch betriebenen bzw. auch Hybridfahrzeugen, so entsteht ein realistischeres Bild hinsichtlich der Beiträge der verschiedenen Antriebsformen im Hinblick auf eine Emissionsminderung.



Abb.12 CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der PKW-Produktion mit unterschiedlichen Antriebsformen<sup>26</sup>

Abb.12 zeigt einen Vergleich der produktionsbedingten Emissionen, aufgeteilt nach Antriebsstrang und „Rest“-Fahrzeug aus einer aktuellen VDI-Studie.<sup>26</sup> So entstehen bei rein elektrischen und Hybrid-Antrieben Zusatzemissionen insbesondere bei der

<sup>24</sup> Marwan Abdul Hakim Shaah et al, "A review on non-edible oil as a potential feedstock for biodiesel: physicochemical properties and production technologies", Royal Chemical Society Adv., 11, 25018-25037 (2021)

<sup>25</sup> Shilpi Khurana et al, "Non-Edible Oils as Biodiesel " Chapter 10 in Oils and Fats as Raw Materials for Industry, Wiley, Jan. 2024 ,

<sup>26</sup> „Wann wird Autofahren grün“? VDI-Analyse der CO<sub>2</sub>eq.-Emissionen von PKW mit verschiedenen Antriebssystemen, VDI Dezember 2023

Herstellung der Batterien mit späteren Vorteilen in der Nutzungsphase. Bei der Produktion eines Elektroautos mit einer 82 kWh – Batterie sind die Emissionen bei 10,12 to CO<sub>2eq.</sub>, bei einem Verbrenner lediglich 1,21 to CO<sub>2eq.</sub>.

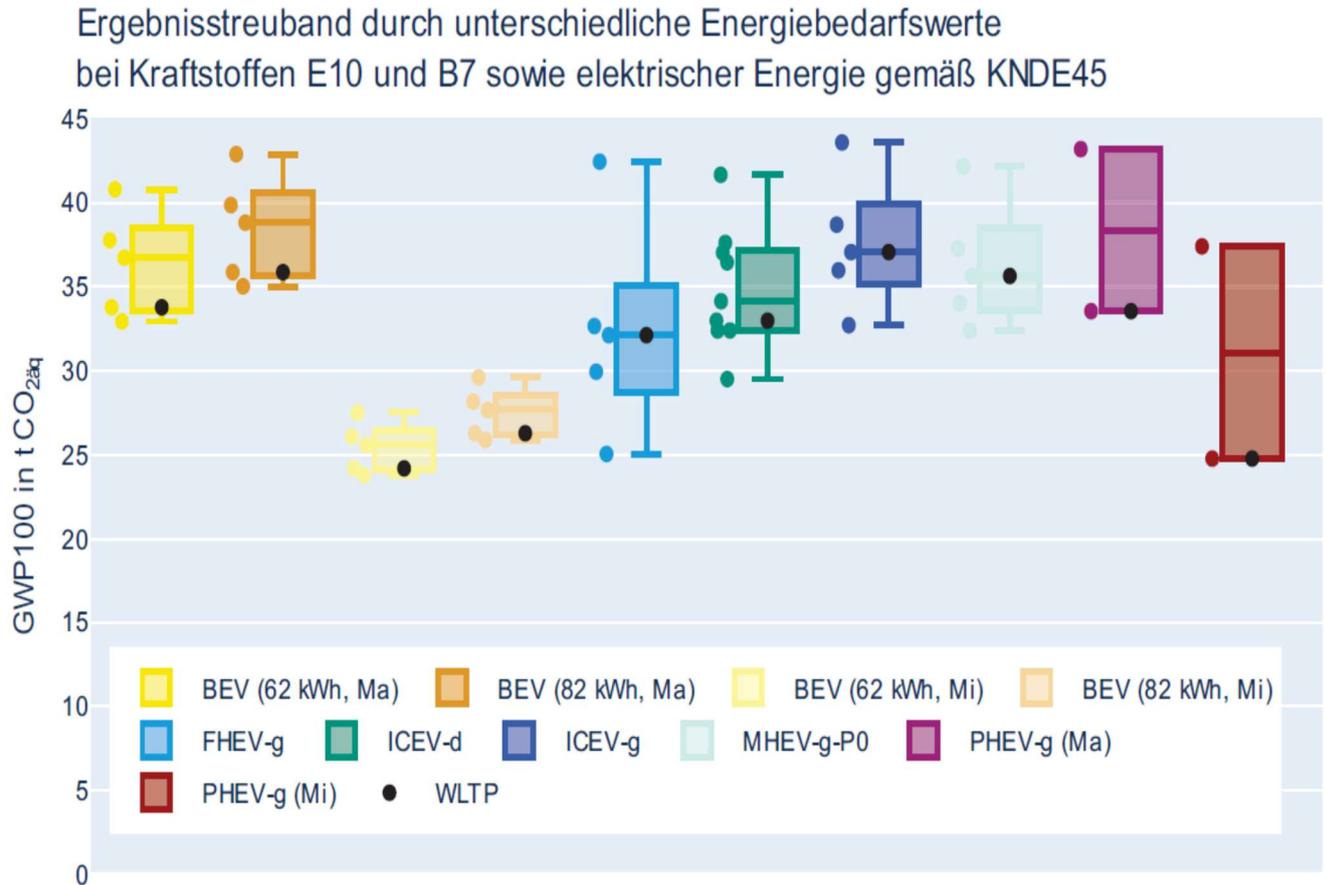


Abb. 13 Ergebnis der VDI-Studie „Wann wird Autofahren grün“, VDI, Dezember 2023: Zusammenfassender Vergleich Treibhausgas-Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten unterschiedlich angetriebener Fahrzeuge nach 200000km inklusive Herstellung unter Variation des Energiebedarfs, der Bereitstellung von elektrischer Energie gemäß Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (KNDE 45) unter Verwendung des kurzfristigen Marginalansatzes (Ma), des Mittelwertansatzes Mi und der aktuellen Standardkraftstoffe E 10 und B724<sup>26 27</sup>

Durch Einbeziehung der herstellungsbedingten Emissionen relativiert sich der Vorteil von elektrisch betriebenen Fahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Hybrid- oder Verbrennungsantrieben. Ursache der Emissionen sind vor allem die Batteriespeicher. Auch die weitere Entwicklung des Strommixes beeinflusst die Gesamtbilanz. Dies

<sup>27</sup> Legende für Abb. 9: BEV: batterieelektrisches Fahrzeug; FHEV: Vollhybridfahrzeug; ICEV: Verbrenner; MHEV: „Mild-Hybridfahrzeug; PHEV: Plug in-Hybridfahrzeug; g=Benzin; d= Diesel; Ergebnisse aus Standardfahrzyklen (WLTP: Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)

zeigt ein Vergleich in vorgenannter VDI-Studie für Fahrzeuge nach einer Fahrleistung von jeweils 200.000 km, Abb. 13 <sup>26</sup>.

Ein Vergleich zwischen elektrisch betriebenen und zukünftig mit synthetischen, CO<sub>2</sub>-verminderten Kraftstoffen dürfte zu einem weiteren Angleich der Ergebnisse führen und die derzeit in Deutschland verfolgte „all-electric“ Strategie zusätzlich in Frage stellen.

Betrachtet man die Fahrzeuge von der Herstellung bis zu einer angenommenen Laufleistung von 200.000 km, so erzielen gemäß der VDI-Studie E-Autos und Plug-in-Hybride zwar bessere Ergebnisse, keinesfalls aber sind rein elektrisch betriebene Fahrzeuge „Null-Emissions“-Fahrzeuge

Nach 200.000 km, bezogen auf deutsche Verhältnisse und auf einen Standard-Fahrzyklus (WLTP), betragen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des E-Autos 24,2 t CO<sub>2</sub> bzw. des Plug in-Hybridfahrzeugs der Kompaktklasse 24,8 t CO<sub>2</sub>, des Diesel-Fahrzeugs 33 t CO<sub>2</sub> und des Benziners 37 t CO<sub>2</sub>. Erst ab etwa 90.000 Kilometer Laufleistung werden E-Autos in der Gesamtbilanz klimafreundlicher als Verbrenner.<sup>28</sup>

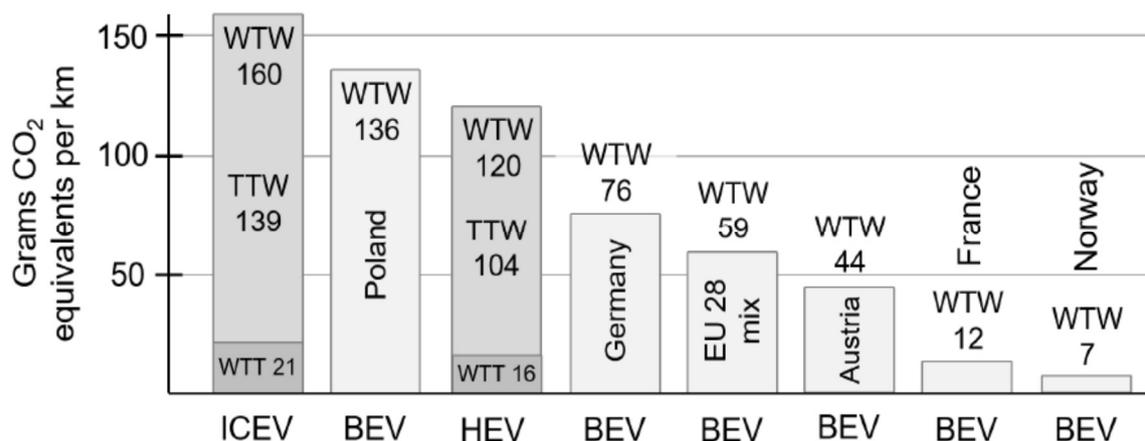


Abb. 14 Well-to-Wheel CO<sub>2</sub>-eq-Emissionen ausgewählter Mittelklassewagen mit unterschiedlichen Antriebssystemen und unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung in europäischen Ländern <sup>28 29</sup>

Der Einfluss des Strommixes auf die CO<sub>2</sub> eq-Emissionswerte beim Betrieb von E-Fahrzeugen ist erheblich. Ein Ländervergleich in Abb. 14 zeigt den CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Kilometer für verschiedene Antriebsformen im Vergleich zum Verbrenner.

<sup>28</sup> <https://www.vdi.de/themen/mobilitaet/vdi-oekobilanz-fuer-pkw-antriebe>, accessed may 25, 2024

<sup>29</sup> Legende zu Abb. 14: BEV: batterieelektrisches Fahrzeug; FHEV: Vollhybridfahrzeug; ICEV: Verbrenner; MHEV: „Mild-Hybridfahrzeug; PHEV: Plug in-Hybridfahrzeug; g=Benzin; d= Diesel; Ergebnisse aus Standardfahrzyklen (WLTP: Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)

So hat ein e-Mittelklassewagen in Polen (viel Kohlestrom) kaum Vorteile gegenüber dem Verbrenner, ganz anders der Vergleich mit Frankreich (viel Atomstrom) und Norwegen (viel Wasserkraft).

In gleicher Weise gestaltet sich auch der Vergleich der Fahrleistung, an deren jeweiligen Schnittpunkten die akkumulierten Emissionen des e-Fahrzeugs im Verlauf seines Lebenszyklus geringer sind als die eines Verbrenners, vgl. Abb. 15. <sup>30 31</sup>

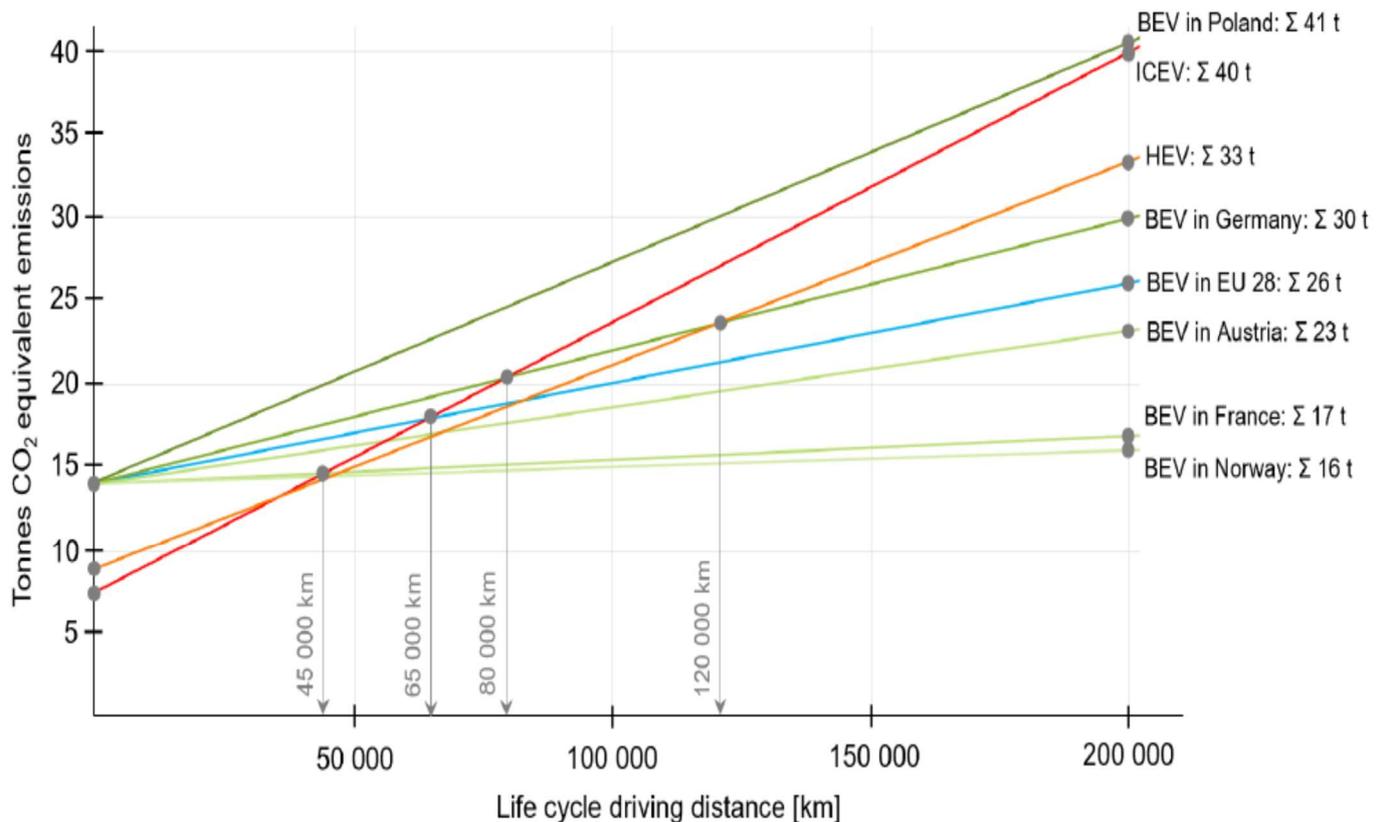


Abb. 15 Well-to-Wheel CO<sub>2</sub>-eq-Emissionen ausgewählter Mittelklassewagen mit unterschiedlichen Antriebssystemen, unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung in europäischen Ländern und Fahrleistung <sup>30 31</sup>

<sup>30</sup> M.Hirz et al, „Life-Cycle CO<sub>2</sub>-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems”, World Electr. Veh. J. 13, 61 (2022)

<sup>31</sup> Legende zu Abb. 15: ICEV: Verbrennerantrieb, BEV: Batterie-elektrischer Antrieb, HEV: Hybridantrieb, WtW: „well-to-wheel, WTT: well-to-tank, TTW: tank-to-wheel

Andere, auf europäische Verhältnisse fokussierte Studien<sup>32 33 34 35</sup> kommen, je nach unterstellten Randbedingungen wie zukünftiger Strommix, verbessertes

Lademanagement für batteriebetriebene Fahrzeuge und Weiterentwicklungen der Batterien, zu sehr unterschiedlichen, zum Teil kontroversen Ergebnissen.

Zukünftiges Verbesserungspotential beim Elektrofahrzeug liegt hauptsächlich in der Weiterentwicklung einer nachhaltigen Produktion, in einem Recycling der Batteriespeicher und in einem nachhaltigeren Strommix einschließlich einer entsprechenden Infrastruktur.

Welt- und EU-weit wird sich jedoch nur eine Multipfad-Strategie mit verschiedenen Antriebsformen durchsetzen können, so wie sie derzeit in China verfolgt wird. Trotz des hohen Exportanteiles elektrisch betriebener Fahrzeuge setzt China wieder verstärkt auf eine Weiterentwicklung von Verbrennungsantrieben. Bis 2060 soll neben dem Ausbau der Elektromobilität auch der Verbrennungsmotor weiterentwickelt und mit alternativen, nicht-fossilen Kraftstoffen betrieben werden.<sup>36</sup>

## 2.2. Schiffsverkehr

Rund 90 Prozent des globalen Warenhandels werden per Schiff abgewickelt. Der damit verbundene Ausstoß von Klimagasen betrug im Jahr 2018 ca. 1,1 Mrd. t CO<sub>2eq</sub> bzw. 2,9 % der gesamten anthropogen erzeugten Emissionen - mit weiterhin stark zunehmender Tendenz.

Maßnahmen zur Begrenzung der Emissionen werden über die Internationale Seeschiffahrts-Organisation (IMO), der 175 Staaten angehören, gesteuert. Im Rahmen der „International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)“ wurden zunächst Schwefel- und Stickoxid-Emissionen adressiert, die auf die Nutzung des als Schiffstreibstoff immer noch weit verbreiteten Schweröls zurückgehen.

So wurden unter anderem „emission control areas (ECA's)“ ausgewiesen, in denen Schweröl nicht mehr verwendet, sondern durch entschwefeltes „Marine Fuel Oil“ oder andere emissionsärmere Treibstoffe ersetzt werden muss. Beispiele für ECA's

---

<sup>32</sup> M.Wietschel et al, „Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland“, Paper S 02/2019, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung

<sup>33</sup> „Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO<sub>2</sub>-Bilanz?“ C.Buchal et al, ifo Institut, München (2019), ifo Schnelldienst, 2019, 72, Nr. 08, 40-54

<sup>34</sup> Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IV, „Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter“, Abschlussbericht 2021

<sup>35</sup> J.Buberger et al, „Total CO<sub>2</sub>-equivalent Life-Cycle Emissiones from Commercially Available Passenger Cars“, Renewable and Sustainable Energy Reviews 159, 112158 (2022)

<sup>36</sup> C. Bäuchle, „China greift nach dem Herz der etablierten Autoindustrie“, Automobilwoche, 17.1.2024

sind Ost- und Nordsee und eine 200 Meilenzone vor der amerikanischen und kanadischen Küste.<sup>37</sup>

Die Umstellung des üblichen fossilen Antriebs auf alternative Optionen verläuft wegen der langen Nutzungszeiten der Schiffe und der in den Häfen aufzubauenden Infrastruktur nur langsam.

Immerhin hat sich die IMO 2023 auf neue Klimaziele verständigt mit dem Ziel, bis etwa 2050 die weltweite Schifffahrt klimaneutral zu gestalten. Die Treibhausgasemissionen sollen "unter Berücksichtigung der unterschiedlichen nationalen Gegebenheiten" bis zum „Jahr 2050 oder kurz danach" auf Null sinken.

Als Zwischenziel wurde vereinbart, bis 2030 die Emissionen im Vergleich zum Referenzjahr 2008 um mindestens 20 Prozent, bis 2040 dann um mindestens 70 % zu reduzieren.

Für die „maritime Energiewende“ werden mehrere Optionen diskutiert bzw. befinden sich bereits in der Einführungsphase.

Batterieelektrische Antriebe kommen wegen Gewicht und Platzbedarf der Speicher nur für kleine Schiffe und auf kurzen Strecken infrage, zum Beispiel für Fähren, längerfristig auch für Binnen- und Feederschiffe.

So plant die niederländische Reederei Port-Liner 15 vollelektrische Frachtschiffe als Zubringer für den Hafen Rotterdam. Die Batterien für eine bis zu 34-stündige Betriebszeit befinden sich in Containern, die im Hafen geladen und ausgetauscht werden können.<sup>38</sup>

Für große Entfernungen kommen als alternative Schiffstreibstoffe Methanol, Ammoniak und verflüssigtes Erdgas (LNG) in Frage, langfristig vielleicht auch flüssiger Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) direkt oder elektrifiziert in Kombination mit Brennstoffzellen. In allen Fällen sind sowohl eine andere Motorentchnik als auch konstruktive Anpassungen z.B. für Tanks, Sicherheit und Abgasbehandlung erforderlich. Einige Eigenschaften dieser Treibstoffe zeigt Abb. 16.<sup>39</sup>

Flüssiggas-Antriebe (LNG) auf fossiler Basis sind zwar nicht per se klimaneutral, aber mindern die CO<sub>2</sub>-Emissionen um immerhin 30 %.

Der Wechsel zu alternativen Kraftstoffen kommt in der Regel nur für Neubauten in Frage. Wegen der limitierten Verfügbarkeit der neuen Treibstoffe werden die neuen Schiffsmotoren häufig für einen Dual-Fuel-Betrieb ausgelegt.

---

<sup>37</sup> [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\)](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL)), accessed may 25,2024

<sup>38</sup> Entnommen aus: <https://www.infineon.com/cms/de/discoveries/elektrische-schiffe>, accessed may 25,2024

<sup>39</sup> Entnommen aus: N.Wisser et al, "Methanol as marine fuel", Ökoinstitut Berlin, März 2023

Der Schiffsmotorenhersteller MAN Energy Solutions prognostiziert, dass bis 2030 etwa 40 % der geordneten Motoren auf 2-Takt-Motoren mit Ammoniak entfallen werden, gefolgt von Methanol (35 %) und Flüssiggas/LNG mit 23 %.

Einen anderen Weg gehen die BASF und die chinesische CPGC, ein Tochterunternehmen der China State Shipbuilding Corporation (CSSC) in einer Kooperation zur on-board Entfernung und Speicherung von CO<sub>2</sub> aus dem Abgas von Schiffen, zunächst auf Basis von LNG-Antrieb.<sup>40</sup>

Fuel	Gravimetric energy density [MJ/kg]	Volumetric energy density [MJ/l]	Storage pressure [bar]	Storage temperature [°C]	Tank size* based on energy density
Liquefied hydrogen	120	8.5	1	-253	7.6
Ammonia	19	12.7	1 or 10	-34 or +20	4.1
Liquefied methane	50	23.4	1	-162	2.3
Methanol	20	15.8	1	Ambient	2.3 - 2.5*
MGO	43	36.6	1	Ambient	1
HFO	40	35	1	Ambient	1

Notes: \*tank volume relative to conventional MGO tank. \*tanks can be placed more flexible and space saving depending on the ship design.

Abb. 16 Eigenschaften alternativer Schiffstreibstoffe im Vergleich zu leichtem Marinegasöl (MGO) und Schweröl (HFO)<sup>39</sup>

### 2.2.1. Methanol:

Vor allem für die Schifffahrt entwickelt sich Methanol zu einer wichtigen Alternative zu fossilen Kraftstoffen wie Schweröl, Marinediesel oder Flüssigerdgas.

Dass Methanol ein alltagstauglicher Treibstoff für die Schifffahrt sein kann, zeigt das Beispiel der "Stena Germanica". Die Fähre verkehrt seit 2015 zwischen Kiel und Göteborg mit Methanolantrieb.

<sup>40</sup> <https://www.chemietechnik.de/sicherheit-umwelt/basf-und-cpgc-wollen-ccs-technologie-auf-schiffen-nutzen>, accessed June 13,2024

Auch die dänische Reederei Maersk<sup>41</sup> hat sich das Ziel gesetzt, bis 2050 alle Transporte auf Basis von „grünem“ Methanol CO<sub>2</sub>-frei durchzuführen. Maersk hat im Sommer 2021 acht Containerschiffe mit Methanolantrieb bestellt.

Ebenso betreibt Waterfront Shipping, eine Tochterfirma von Methanex als größtem Methanolproduzenten weltweit, inzwischen 19 Tankschiffe mit Methanolantrieb.

Die chinesische Reederei COSCO hat zwölf 24000teu<sup>42</sup>-Containerfrachter mit Methanolantrieb Auftrag gegeben.

Ane Maersk



Stena Germanica

Abb. 17 Schiffe mit Methanolantrieb

Methanol wird weltweit gehandelt, siehe Abb. 18<sup>43</sup>. Entsprechend weit entwickelt ist auch die Infrastruktur für die Versorgung der Schifffahrt.

Limitierend ist die Verfügbarkeit von „grünem“ Methanol. Allein Maersk hat einen Bedarf von 400.000t/a, der mit der weiteren Umstellung zunehmen wird. Die Schiffe sind mit Dual-Fuel-Motoren ausgerüstet, die auch mit Dieselöl betrieben werden können.

<sup>41</sup> <https://www.maersk.com/news/articles/2022/12/12/maersk-accelerating-the-transition-from-fossil-fuel-follower-to-green-industry-leader>, accessed may 26,2024

<sup>42</sup> teu: Twenty-foot Equivalent Unit (zwanzig-Fuß-Standardcontainer)

<sup>43</sup> Global Methanol Outlook 2023: Growth and Decarbonization, Methanol Market Services Asia Ltd., presentation, 2023 Canadian Petrochemical Summit June 7th, 2023

Um die weltweite Produktionskapazität von grünem Methanol zu steigern, ist Maersk strategische Partnerschaften mit sechs Unternehmen eingegangen, um bis Ende 2025 mindestens 730.000 Tonnen umweltfreundliches Methanol pro Jahr zu beschaffen.

Die sechs Unternehmen sind der chinesische Finanzinvestor CIMC ENRIC, der dänische Solarparkentwickler und -betreiber European Energy, die chinesische Green Technology Bank, der dänische Energieversorger Orsted, das Schweizer Chemieunternehmen Proman und der US-amerikanische Bio-Treibstoffhersteller WasteFuel<sup>44</sup>.

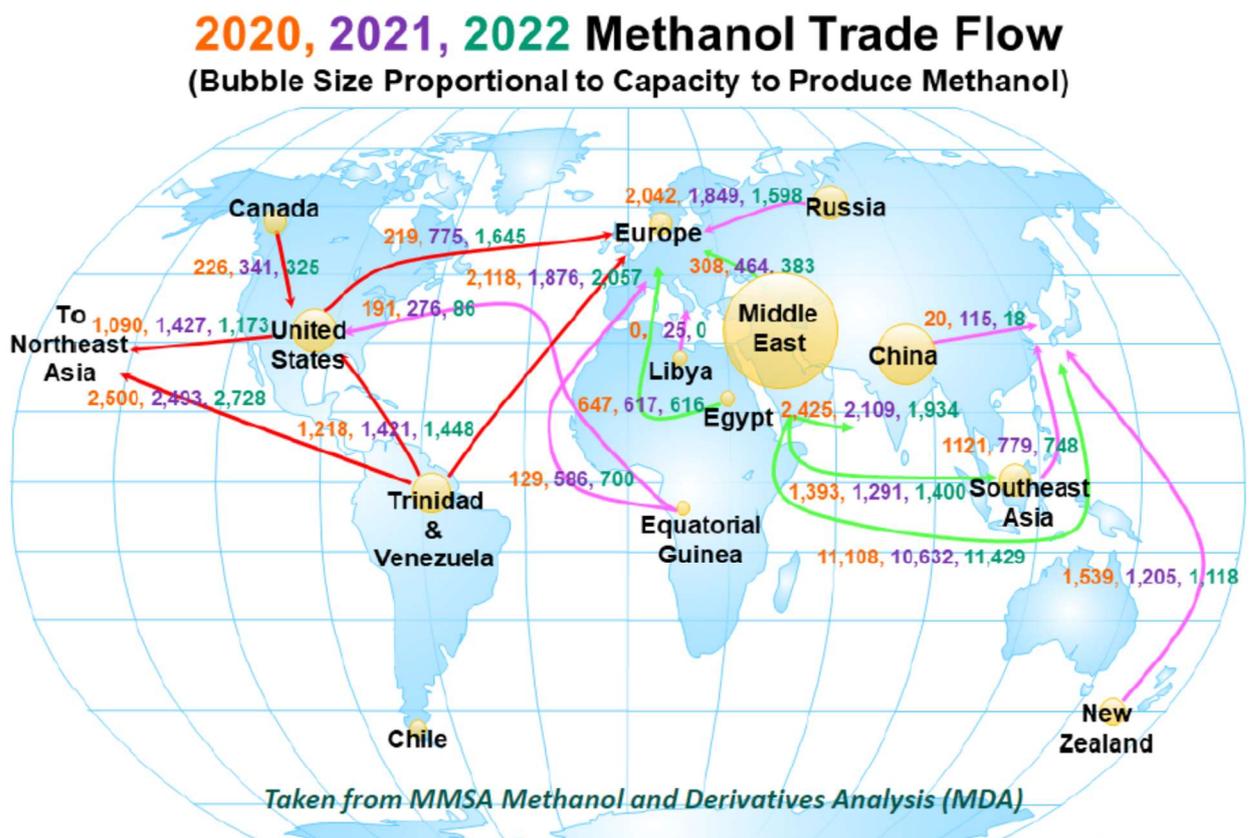


Abb. 18 Handelsrouten für Methanol (in 1000 to/a)<sup>43</sup>.

Die IRENA<sup>45</sup> erwartet einen Anstieg der Methanol-Produktion bis 2050 auf 500 Mio. to/a mit einem Anteil von 80% Biomethanol und e-Methanol.<sup>15 46</sup>

<sup>44</sup> <https://www.maersk.com/news/articles/2022/03/10/maersk-engages-in-strategic-partnerships-to-scale-green-methanol-production> accessed June 17, 2024

<sup>45</sup> International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

<sup>46</sup> "A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050", IRENA International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021

### 2.2.2. Ammoniak:

Ammoniak ist zwar schwieriger zu handhaben, giftig und leicht entzündlich, jedoch ist der sichere Umgang seit vielen Jahren Stand der Technik. Ammoniak ist vor Methanol mit ca. 150 Mio. Tonnen (2023) eine der weltweit am meisten gehandelten Chemieprodukte mit einer etablierten Infrastruktur für Lagerung und Transport, siehe Übersicht in Abb. 19.<sup>47</sup>

Weltweit transportieren ca. 170 Tanker ca. 20 Mio. t/a Ammoniak. Europa verfügt über 30 Ammoniakterminals.<sup>48</sup>



Abb. 19 Transport-Infrastruktur für Ammoniak<sup>47</sup>

Ammoniak wird aus (Luft)Stickstoff und fossil-basiertem Wasserstoff hergestellt. 70 % der heutigen Ammoniak-Produktion basiert auf der Dampfreformierung von Erdgas zu Wasserstoff, 30 % auf Kohlevergasung.

<sup>47</sup> K. Machaj et al, „Ammonia as a potential marine fuel: A review“, Energy Strategy Reviews Volume 44, November 2022, 100926

<sup>48</sup> Daten aus „Kurzeinschätzung von Ammoniak als Energieträger und Transportmedium für Wasserstoff“, Umweltbundesamt. 28. Februar 2022

Die weltweite Produktionskapazität für Ammoniak ist derzeit deutlich höher als der Verbrauch und beträgt 240 Mio. Tonnen (2023). Die Kapazität soll bis 2030 auf 290 Mio. Tonnen steigen <sup>49</sup>.

Laut einer IRENA-Studie soll der Bedarf an Ammoniak bis zum Jahr 2050 dann auf 550 Mio. Tonnen wachsen. Ein erheblicher Anteil (ca. 330 Mio. Tonnen) würden weiterhin konventionell auf fossiler Basis (im wesentlichen Erdgas), der verbleibende Teil entweder „blau“, d.h. fossil mit einer CO<sub>2</sub>-Abscheidung und „grün“, d.h. mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff hergestellt werden. Davon sollen 110 Mio. Tonnen als Wasserstoff-Träger (zur späteren Rückspaltung) und ca. 80 Mio. Tonnen als Schiffstreibstoff zur Verfügung stehen <sup>50</sup>.

Die klimaneutrale Herstellung von Ammoniak aus Elektrolysewasserstoff ist erst im Entstehen.

Nach einer IEA-Studie auf Basis der bekannten Projekte (Stand 2021) soll die jährliche Ammoniak-Produktionskapazität bis 2030 auf ca. 8 Mio. Tonnen steigen, wobei etwa die Hälfte auf Elektrolyse-Wasserstoff und Methan-Pyrolyse, die andere Hälfte auf Erdgas-Reformierung mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung (CCS) beruht <sup>51</sup>, vgl. Abb. 20.

Eine optimistischere Kapazitätsprognose auf Basis bekanntgegebener Projekte erwartet bis 2030 eine jährliche Produktionskapazität von 14 Mio. Tonnen (schwerpunktmäßig in Australien, dem Oman und Mauretanien) und von 71 Mio. Tonnen in 2040 <sup>52</sup>.

Für die Nutzung von Ammoniak als Treibstoff spricht die Abwesenheit von Kohlenstoff. Ammoniak erzeugt also bei der Verbrennung keine CO<sub>2</sub>-Emission, wohl aber Stickoxide mit erheblich höherer Klimawirkung als CO<sub>2</sub>.

Wegen der bei der Ammoniak-Verbrennung entstehenden Stickoxide müssen die Abgase von Ammoniakantrieben mit einer katalytischen NOX-Reduktionsanlage behandelt werden.

Ammoniak kann nach Rückspaltung auch als Wasserstoffträger dienen, zum Beispiel für Brennstoffzellen und elektrische Antriebe.

Der im Vergleich zu „grünem“ Methanol verhaltenere Aufbau von entsprechenden Ammoniakkapazitäten führt zu einer späteren Einführung von Ammoniak-

---

<sup>49</sup> Statista, "Production capacity of ammonia worldwide from 2018 to 2023, with a forecast for 2026 and 2030", accessed 17 June 2024

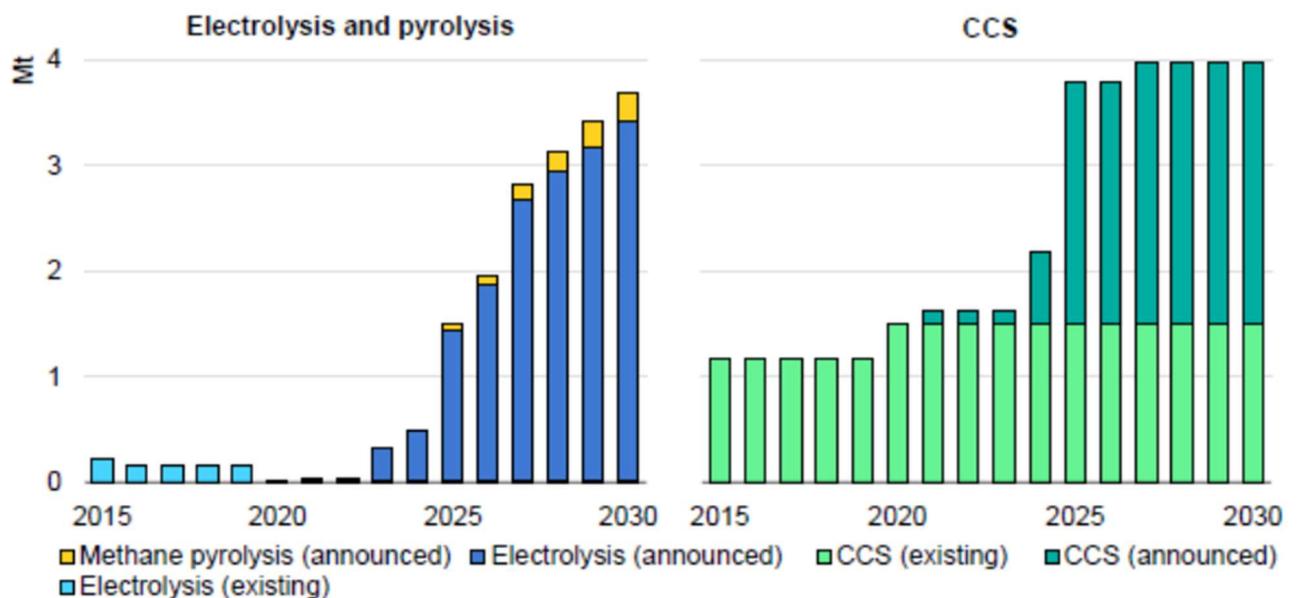
<sup>50</sup> IRENA and AEA (2022), Innovation Outlook: Renewable Ammonia, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn

<sup>51</sup> <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>, Okt. 2021, accessed 17 June 2024

<sup>52</sup> N. Bora et al., "Green ammonia production: Process technologies and challenges", Fuel Vol.369, 131808 (2024)

betriebenen Schiffsmotoren und Turbinen. Die breite Einführung von Schiffen mit Ammoniak-Antrieb wird ab 2026 erwartet

Die norwegische Reederei Eidesvik plant, mehrere ihrer Versorgungsschiffe für off-shore Plattformen mit Ammoniak-Antrieb auszustatten. In einem ersten Schritt wird ein Dual-Fuel-Motor von Wärtsilä mit einer Mischung aus Flüssiggas und 70 % Ammoniak eingesetzt, später sollen dann 100 % Ammoniak mit einem kleinen Zusatz von "Zündkohlenwasserstoffen" verwendet werden.



IEA, 2021.

Abb. 20 Prognose der weltweiten CO<sub>2</sub>-neutralen Ammoniak-Produktion nach einer IEA-Studie 2021<sup>51</sup>

Eidesvik ist auch an einem EU-geförderten Projekt („ShipFC“) beteiligt, bei dem Ammoniak zunächst in Wasserstoff und Stickstoff gespalten wird und die Wasserstoff-Fraktion einer 2 MW Hochtemperatur-Brennstoffzelle zugeführt wird. Diese erzeugt Strom für einen elektrischen Antrieb.<sup>53 54</sup>

<sup>53</sup> <https://eidesvik.no/viking-energy-with-ammonia-driven-fuel-cell>, accessed May 25, 2024

<sup>54</sup> <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2021/march-2021/worlds-first-hightemperature-ammonia-powered-fuel-cell-for-shipping>, accessed May 25, 2024

MAN Energy Solutions erwartet, dass der Anteil von Ammoniak bei großen Handelsschiffen bis zum Jahr 2050 rund 35 % der verwendeten Treibstoffe ausmachen wird.<sup>55</sup>

Dies ist konsistent mit einer Studie der European Marine Equipment and Systems Association (EMISA), die eine anfänglich schnelle Einführung von Methanol- und LNG-Antrieben, dann aber einen zunehmenden Einsatz von Ammoniak-Antrieben prognostiziert, Abb. 21<sup>56</sup>

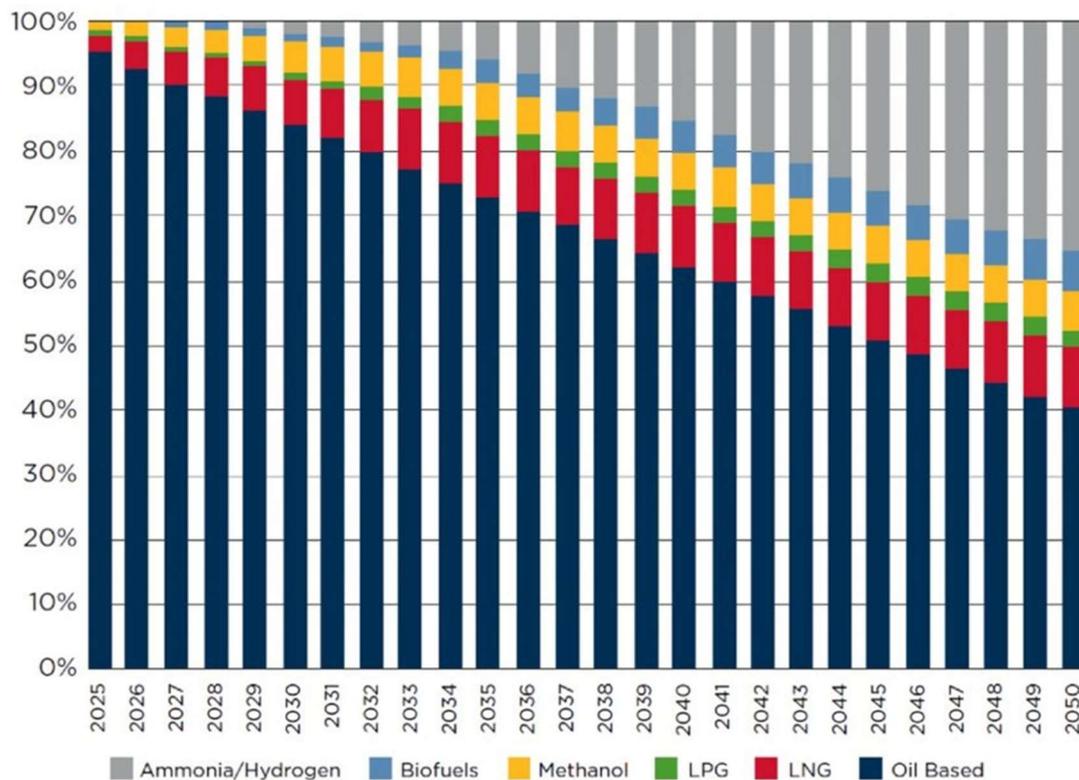


Abb. 21 Anteile zukünftiger Schiffstreibstoffe<sup>56</sup>

### 2.3. Flugverkehr

Die positive Entwicklung des Flugverkehrs bis 2021, in Abb. 22 in Form verschiedener Kenngrößen gezeigt<sup>57</sup>, wird sich auch in den kommenden Jahren fortsetzen und den Druck auf Einführung klimaschonenderer Treibstoffe und Antriebsformen erhöhen.

<sup>55</sup> <https://www.man-es.com/de/unternehmen/pressemitteilungen/press-details/2024/04/11/immer-mehr-schiffbauprojekte-mit-ammoniakmotoren>, accessed May 25, 2024

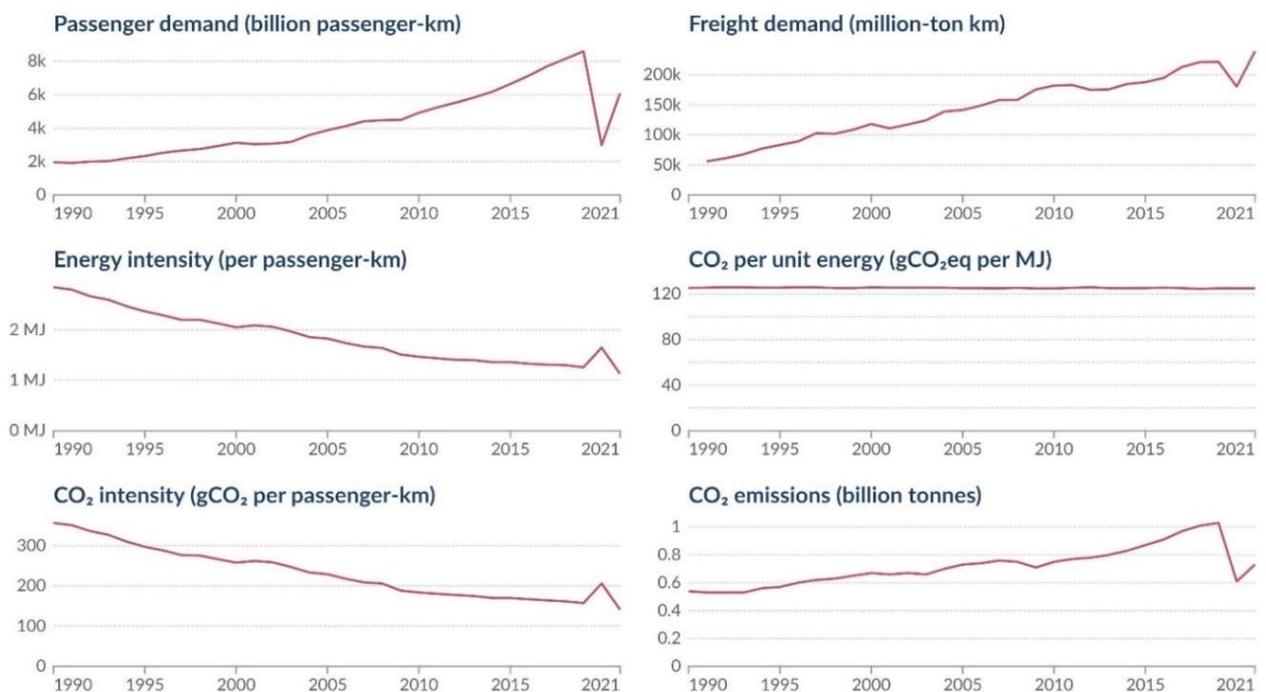
<sup>56</sup> <https://emisa.eu/future-maritime-fuels-part-2>, Sept. 2023, accessed June 17, 2024

<sup>57</sup> H.Ritchie „What share of global CO<sub>2</sub> emissions come from aviation? Orworldindata.org, April 08, 2024

2019 wurden weltweit ca. 300 Mio. Tonnen Kerosin verbraucht, dem eine Produktion von nur 0,2 Mio. Tonnen klimaschonender „Sustainable Air Fuels (SAF's)“ gegenüberstand. Nach einem kurzen, Corona-bedingten Einbruch in 2020 wird bis 2050 ein Zuwachs des Kerosinverbrauchs auf über 500 Mio. Tonnen erwartet, verbunden mit CO<sub>2</sub> eq-Emissionen von 1,7 Gigatonnen pro Jahr, vgl. Abb. 23<sup>58</sup>.

Eine breite Verwendung batterieelektrischer Antriebe für Flugzeuge ist wegen des hohen Gewichts der Speicher auf absehbare Zeit nicht zu erwarten.

### Global aviation demand, energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions, 1990 to 2021



Data source: Bergero et al. (2023). Pathways to net-zero emissions from aviation.

OurWorldInData.org/energy | CC BY

Note: Carbon emissions are measured in carbon-dioxide equivalents, without adjustment for additional warming at altitude.

Abb. 22 Historische Entwicklung wichtiger Kennzahlen des weltweiten Flugverkehrs<sup>57</sup>

Für Kurzstrecken hätten derzeit verfügbare Batterien ein Gewicht von über 50 kg, um 1 kg Kerosin-Verbrauch zu ersetzen.<sup>58</sup>

Auf längere Sicht größere Realisierungschancen haben elektrische Antriebe mit Wasserstoff-basierten Brennstoffzellen für Kurzstrecken und Wasserstoff-Turbinen

<sup>58</sup> „Clean Skies for Tomorrow – Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation“, Insight Report World Economic Forum, Nov. 2020

für Mittel- und Langstrecken. So plant Airbus bis 2035 im Rahmen seines „Zero e“-Projekts derartige Flugzeuge mit Flüssig-Wasserstoff-Betankung zu entwickeln.<sup>59</sup>

Als Ersatz für fossil erzeugtes Kerosin werden mehrere Optionen verfolgt und zum Teil bereits in der Praxis eingesetzt. Dazu gehören hauptsächlich Drop-In Kraftstoffe auf Basis HEFA (hydroprocessed esters and fatty acids) und AtJ (alcohols to Jet), längerfristig auch Treibstoffe, die über Power-to-Liquid Prozesse aus Biomasse und anderen Abfällen erzeugt werden können.

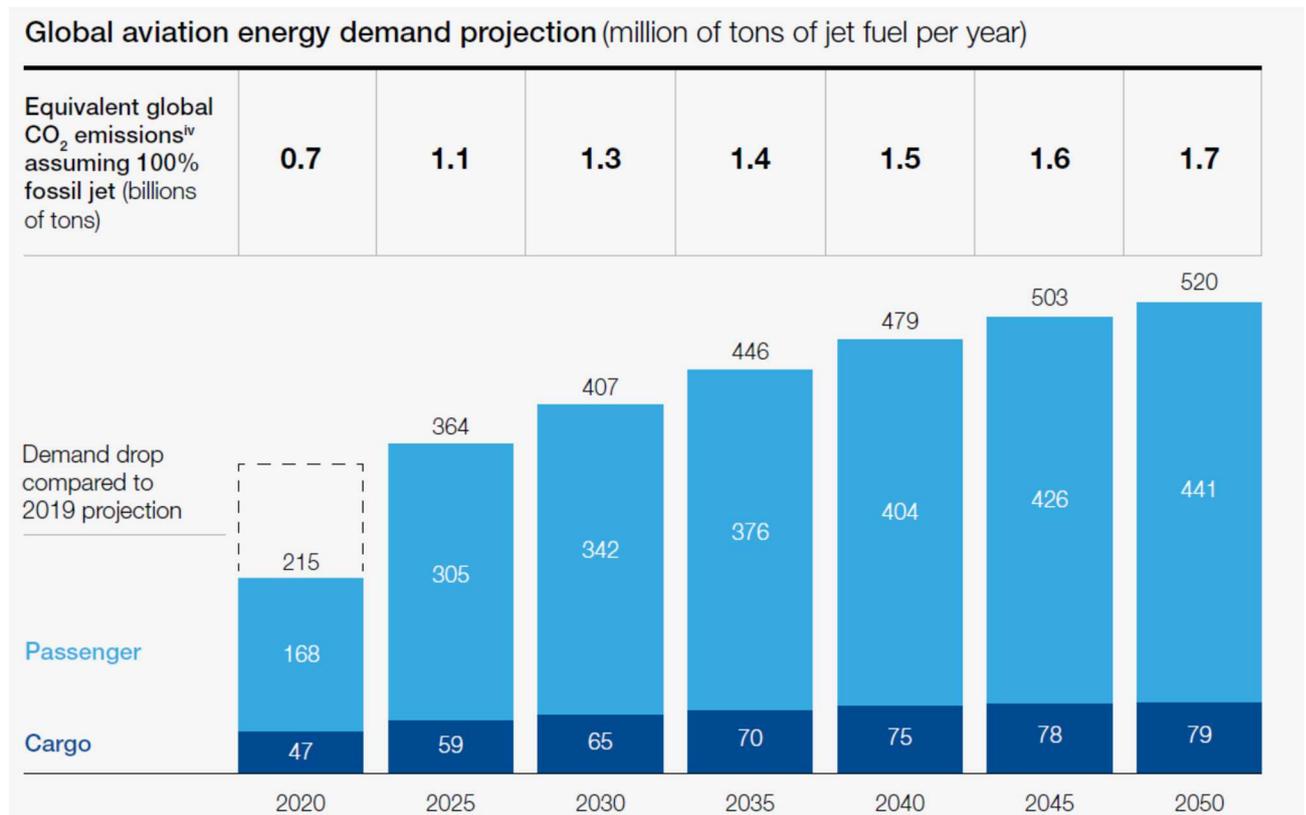


Abb. 23 Prognose des Kerosinverbrauchs und der CO<sub>2</sub> eq-Emissionen bis 2050<sup>58</sup>

Basis für HEFA-Treibstoffe sind pflanzliche und tierische Fette und Altöle, die mit den derzeit existierenden und geplanten Verarbeitungskapazitäten in einer geschätzten Gesamtmenge von jährlich ca. 40 Mio t erzeugt werden können. Dabei fallen typischerweise ca. 20 Mio. t SAF an, mit der etwa 5 % des Kerosinbedarfs in 2030 abgedeckt werden<sup>32</sup> sowie eine gleiche Menge Dieselkraftstoff („HVO“).

Zur Deckung eines erwarteten Gesamtbedarfs von ca. 400 Mio. t SAF in 2030 sind daher erhebliche zusätzliche Kapazitäten erforderlich, die auf einer Erschließung und Verarbeitung weiterer Lipidquellen sowie auf verschiedenen Cellulose- und Stärkequellen, landwirtschaftlichen, kommunalen und forstwirtschaftlichen Abfällen

<sup>59</sup> <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>, accessed May 25, 2024

beruhen. Derzeit ist noch nicht vorhersehbar, ob der Ausbau der Produktionskapazitäten in diesem Zeitraum realistisch ist.

Die Kosten für SAF liegen deutlich höher als für fossiles Kerosin, auch bei einer unterstellten Kostendegression durch economy-of-scale und Effizienz-Effekte. Indikativ bis 2050 wird dies in Abb. 24 <sup>58</sup> dargestellt.

Die Herausforderungen zur Erreichung der Klimaziele im Flugverkehr sind im Vergleich zu denen bei PKW, LKW und Schiffen deutlich höher. Auch hier wird es keinen Königsweg geben, sondern eine Kombination verschiedener, zum Teil noch zu entwickelnder Technologien und entsprechenden Sicherheitsstandards

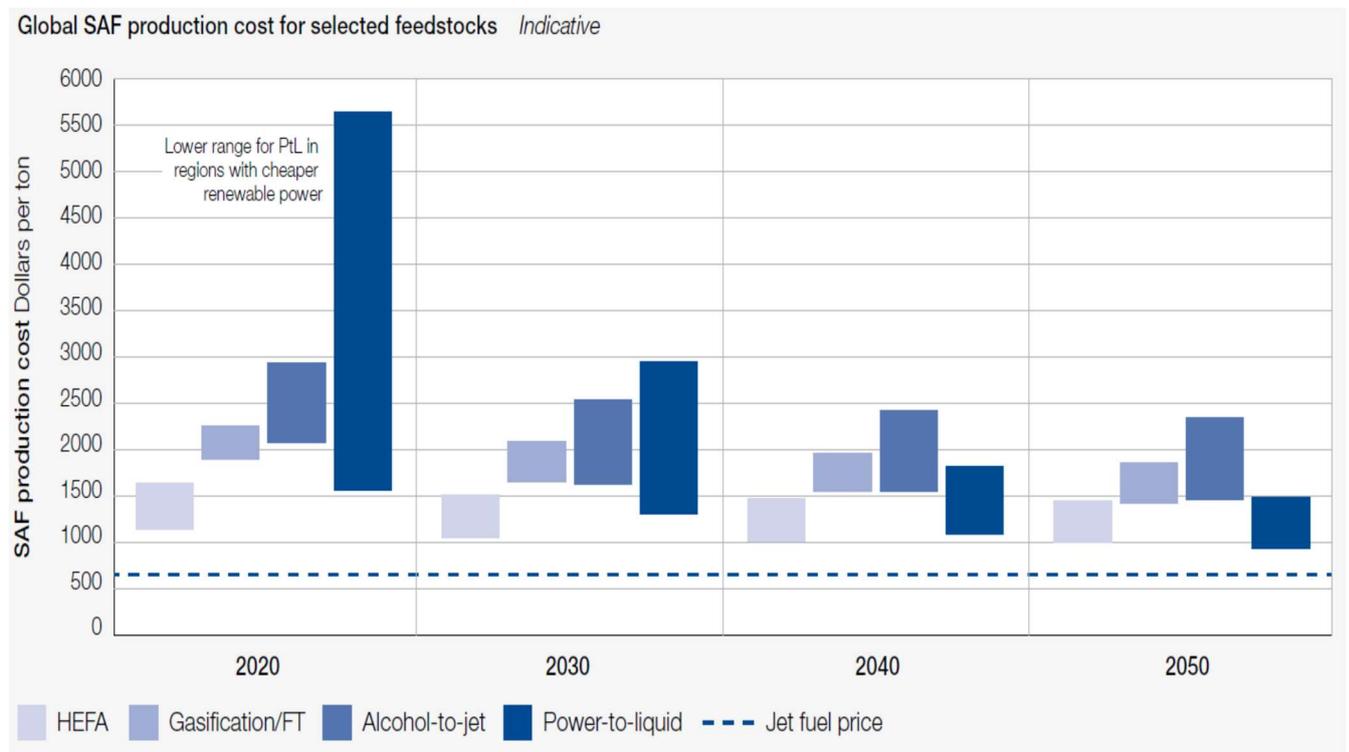


Abb. 24 Erwartete, indikative Kostenentwicklung für SAF's im Vergleich zu Kerosin <sup>58</sup>

## Fazit

Eine Absenkung des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bleibt eine große Herausforderung, insbesondere auch im Bereich der Mobilität. Emissionen zu vermindern erfordert deshalb jegliche denkbare technische Lösung, Pragmatismus und Technologieoffenheit – besser heute als morgen. Dazu gehören internationale Standards und abgestimmte Vorgehensweisen.

Der Bestand an PKW, LKW, Schiffen und Flugzeugen wird auch in den nächsten Jahren wachsen und damit die von ihnen verursachten Emissionen.

Die Umstellung auf neue Antriebsformen und der Ersatz des Bestands wird mehrere Dekaden dauern und beinhaltet hohe Investitionen, Abschreibungen und zusätzlichen Ressourcenverbrauch und neue, zusätzliche geopolitische Abhängigkeiten.

Ein Traum von „all-electric“ wird sich nicht erfüllen lassen, da in vielen Regionen eine entsprechende flächendeckende Infrastruktur unrealistisch erscheint, der zusätzliche Strombedarf mit anderen Energiebedarfen konkurriert und eine ressourcenschonende, recyclingfähige und alltagstaugliche Batterietechnologie noch nicht zur Verfügung steht. Auch sind die Bedingungen, unter denen Batterie-Rohstoffe wie Lithium, Kupfer, Kobalt und Nickel gewonnen werden, ethisch grenzwertig, was aber häufig ignoriert wird.

Zudem hinterlässt auch ein elektrischer Antrieb einen deutlichen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck.

Elektrische Antriebe werden einen wichtigen Stellenwert und Marktanteil haben, aber für die zukünftige Mobilität weltweit müssen zusätzlich andere Technologiepfade verfolgt werden, die zu einer Verminderung der Emissionen möglichst bald und ohne zusätzlichen Infrastrukturaufwand beitragen.

Die Einführung von Beimischungsquoten als Vorbereitung für vollständige Umstellung auf weiterentwickelte Treibstoffe bei Verbrennungsantrieben sind hierbei ein wichtiger und schneller Hebel, da die erforderliche Infrastruktur existiert, die Alltagstauglichkeit bewiesen ist und hinsichtlich der Verminderung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks noch deutliche Reserven existieren, auch bei der Weiterentwicklung der Motoren.

Hinzu kommt, dass ein Mix an Antriebsarten die Resilienz im Mobilitätssektor erhöht. Es hat viele Vorteile, wenn nicht die gesamte Mobilität davon abhängt, ob Strom zuverlässig und überall ausreichend vorhanden ist.

Auch wird dadurch verhindert, dass vorseilende regulatorische Maßnahmen bei der Elektrifizierung des Verkehrs zu einem Export von Bestandsflotten und deren Emissionen führen. Damit wäre dem Klima nicht geholfen.

Als Ersatz für konventionelle, fossil-basierte Treibstoffe wird man sich auf leicht handhabbare Optionen fokussieren, die möglichst geringe Anpassungen der Motorentechnik, der Raffineriestruktur und der Logistik erfordern.

Beispiele dafür sind die Verwendung von hydrierten Ölen (und Altölen) wie HVO, die nicht mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrieren, biogen basiertes Methan (für CNG-, LNG-Antriebe) und Alkohole (Ethanol, Methanol). Methanol lässt sich zudem weitgehend klimaneutral aus CO<sub>2</sub> und regenerativ erzeugtem Wasserstoff herstellen, erste Anlagen sind in Betrieb oder im Bau.

Als „kohlenstoff-freier“ Treibstoff ist Ammoniak eine weitere Option, die bei Schiffen in Kombination mit einer technisch ausgereiften Reinigung der Stickoxid-haltigen Abgase bereits erste Anwendungen gefunden hat.

Für die Hersteller von Verbrennungsantrieben deutet sich an, dass sie zukünftig komplexe und ressourcenintensive Multipfad-Strategien verfolgen müssen, was in Zeiten ökonomischer Stagnation eine zusätzliche Herausforderung bedeutet.