

Global Energy Perspectives

gefördert aus Kapitel 2302, Titel 687 01

BMZ-Abschlussreport / Basisdokument

Global Energy Solutions e.V.

Teil 2: Wesentliche treibhausgasverursachende
Branchen

Kapitel 3-3

Stand 30.Juni 2023

Autorenteam:	
Siddhant Bane	Joern Becker
Ulrich Begemann	Leon Berks
Simon Göss	Prof. Dr. Estelle Herlyn
Dr. Wilfried Lyhs	Dr. Ludolf Plass
Dr. Jens Wagner	Dr. Hans Jürgen Wernicke

Erklärung zum Urheberrecht

Das nachfolgende Dokument ist grundsätzlich ausschließlich für den Empfänger bestimmt. Eine Weitergabe an Dritte oder die Nutzung für Dritte ist – auch auszugsweise – nicht gestattet.

Dem Empfänger des Dokuments wird eine einfache, nicht übertragbare, nicht unterlizenzierbare, eingeschränkte Lizenz gewährt, das Dokument für persönliche, nicht kommerzielle, private Zwecke zu nutzen.

Ulm, im Juni 2023

Global Energy Solutions e.V.

Lise-Meitnerstr. 9

89081 Ulm

Vorsitzender: Christof v. Branconi (Christof.Branconi@Global-Energy-Solutions.org)

3.3 Verkehr

Laut IEA-Bericht für das Jahr 2020 entfallen von den globalen CO₂-Emissionen auf den Verkehrssektor etwa 8 Gt/a. In IEA- Szenario für eine nachhaltige Entwicklung sollen diese bis zum Jahr 2070 auf 1,7 Gt/a sinken, und dies verbleibenden Emissionen müssen durch Negativemissionstechniken kompensiert werden.

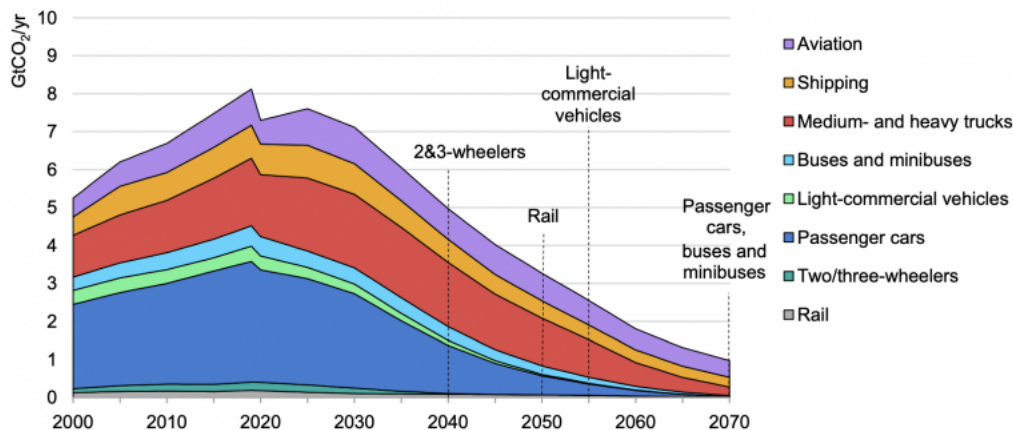


Abbildung 56: Die globalen CO₂-Emissionen aus den Verkehrssektor.

Quelle: Our World in Data, 2020.

Die vertikalen Linien in Abbildung 56 zeigen an, dass ab den Werten auf der Abszisse in den entsprechenden Sektoren keine weitere Nutzung fossiler Brennstoffe zugelassen werden darf. Die fünf Länder mit den höchsten CO₂-Emissionen in diesem Sektor sind die USA, China, Indien, Russland und Japan mit 1,7 Gt/a, 0,9 Gt/a, 0,3 Gt/a, 0,26 Gt/a bzw. 0,2 Gt/a. Die fünf größten Pro-Kopf-Emittenten aus dem Verkehrssektor sind Luxemburg, die USA, Kanada, Katar und Saudi-Arabien mit 10 Mt/Kopf/a, 5,4 Mt/Kopf/a, 5 Mt/Kopf/a, 4,2 Mt/Kopf/a bzw. 4 Mt/Kopf/a. Länder mit niedrigem Einkommen wie Jemen, Somalia, Äthiopien und Niger haben Pro-Kopf-Emissionen aus dem Verkehrssektor zwischen 0,09 Mio. t/Kopf/a und 0,01 Mio. t/Kopf/a.¹⁷⁴ Es ist deutlich, dass die größten absoluten und Pro-Kopf-Emittenten die Hauptverantwortung dafür tragen, ihre Emissionen zu senken, effiziente Mobilitätsformen zu entwickeln und durch „Knowhow-Transfer“, energieeffizientere, bezahlbare, klimaneutrale und sicherere Verkehrsmittel in den unterentwickelten Ländern und den Entwicklungsländern einzuführen. Dies hilft diesen Ländern, um ineffiziente Verkehrsmodelle zu überspringen. Ein Paradigmenwechsel in der Art und Weise wie wir pendeln, welche Kraftstoffe wir verwenden und welche Fahrzeuge wir nutzen, soll nachhaltigere Mobilität für alle gewährleisten.

¹⁷⁴ Vgl. Our World in Data, 2020.

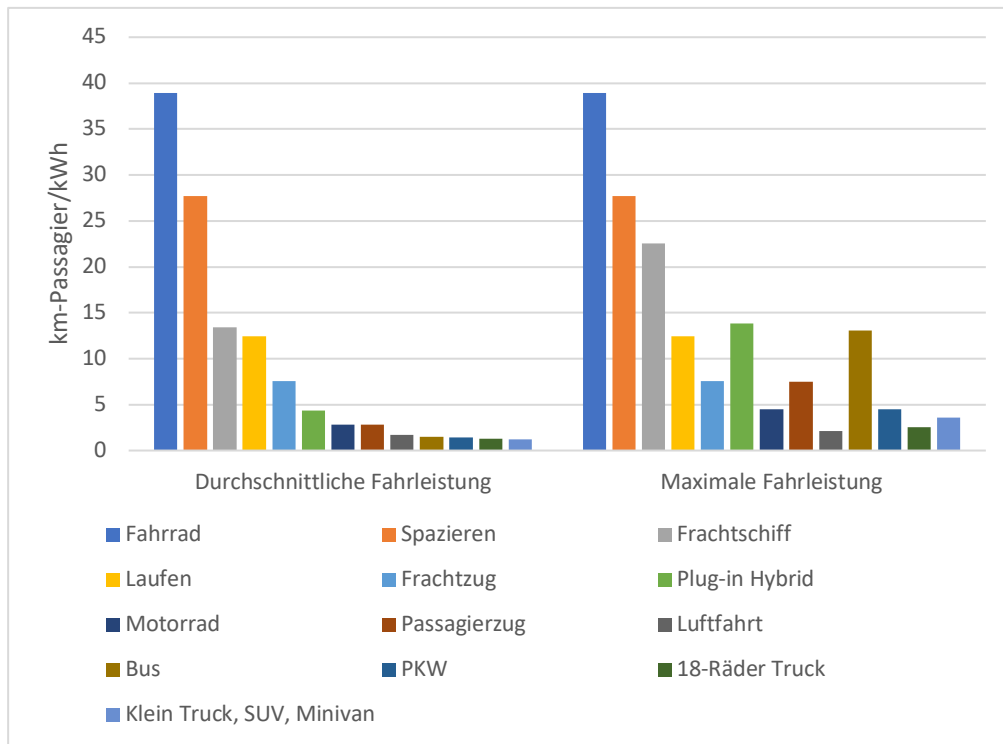


Abbildung 57: Fahrleistung diverser Transportmittel in (km-Passagier/kWh).

Quelle: Truecostblog, 2021.

Abbildung 57 zeigt die pro Passagier zurückgelegte Strecke pro verbrauchter kWh Energie an. Es liegt auf der Hand, dass Radfahren und zu Fuß gehen anderen Verkehrsmitteln in puncto Effizienz überlegen sind. Eine sichere, fußgänger- und fahrradfreundliche Infrastruktur kann Menschen sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungsländern helfen, kürzere Strecken mit dem Fahrrad oder zu Fuß zurückzulegen. Busse, Autos und Plug-in-Hybride können auf einer km-Passagier/kWh-Basis effizienter werden, wenn die Auslastung durch die Förderung von Carsharing und die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel erhöht wird und wenn die Automobilindustrie ihr Geschäftsmodell auf z.B. Mobility as a Service umstellt. Solche Maßnahmen können dazu beitragen, die Nutzung der bestehenden Infrastruktur – PKWs, E-Mobilität, Mopeds, E-Fuel betriebene Fahrzeuge, Straßen usw. – zu maximieren. Für den Langstreckentransport von Personen und Gütern auf der Schiene verbessert die Erhöhung der Fahrgastauslastung die Effizienz. Die Elektrifizierung des Schienenverkehrs durch erneuerbare Energien soll den CO₂-Fußabdruck der Fahrgäste verringern und die Luftqualität verbessern. Frachtschiffe und Züge sind bereits so optimiert, dass sie eine maximale Ladung transportieren können, aber der in Schiffen und einigen Zügen verwendete Kraftstoff trägt zur globalen Erwärmung bei. Hier könnte eine Umstellung auf nachhaltige Kraftstoffe erforderlich sein, was einige technische und logistische Herausforderungen mit sich bringt, auf die später noch eingegangen wird.

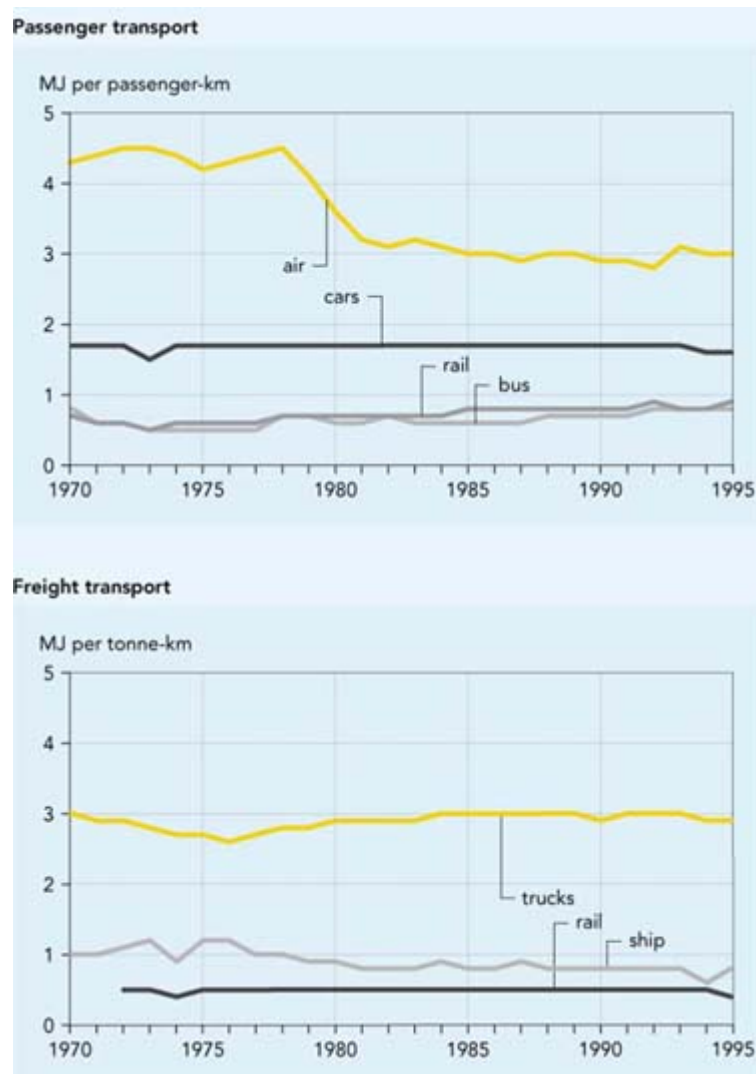


Abbildung 58: Energieintensität des Personen- und Güterverkehrs (8 EU-Länder).

Quelle: European Environment Agency, 2020.

Der Luftverkehr gehört zu den ineffizientesten Verkehrsmitteln,¹⁷⁵ wenn man die Kosten für die Bereitstellung der Verkehrswege außer Acht lässt, ist aber die schnellste Möglichkeit, lange Strecken zu überwinden. Bei einer Gesamtbetrachtung des CO₂-Ausstoßes ist der Luftverkehr wegen der fehlenden CO₂-Emissionen beim Bau der Verkehrswege deutlich besser als der Transport von Bahn und PKW. Bahn und PKW können aufholen, wenn der Ladefaktor verbessert werden würde.¹⁷⁶ Eine der Möglichkeiten zur Dekarbonisierung dieses Sektors ist der Einsatz von E-Treibstoffen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird der Strombedarf für die Synthese von E-Kraftstoffen für den Luftfahrtsektor erörtert.

¹⁷⁵ Vgl. IEA, 2020; European Environment Agency, 2020.

¹⁷⁶ Vgl. Radermacher & Hermann, 2021.

3.3.1 Straßenverkehr

3.3.1.1 Quellen der CO₂-Emissionen

Im Jahr 2011 waren weltweit mehr als eine Milliarde Kraftfahrzeuge in Betrieb.¹⁷⁷ Der US-amerikanische Verlag Ward's schätzt, dass im Jahr 2019 weltweit 1,4 Milliarden Kraftfahrzeuge in Betrieb sein werden. Der weltweite Fahrzeugbesitz pro Kopf lag 2010 bei 148 in Betrieb befindlichen Fahrzeugen pro 1.000 Menschen. China hat mit 322 Millionen Ende September 2018 zugelassenen Kraftfahrzeugen die größte Kraftfahrzeugflotte der Welt. Die Vereinigten Staaten haben mit 832 in Betrieb befindlichen Fahrzeugen pro 1000 Menschen im Jahr 2016 den höchsten Fahrzeugbesitz der Welt.

In einer Studie wurde die Emissionsintensität verschiedener Kraftstoffe für den Transport berechnet.¹⁷⁸ Für die Wasserstofferzeugung durch Wasserelektrolyse für Elektrofahrzeuge wurde eine Emissionsintensität des eingesetzten Stroms von 260 g-CO₂/kWh angenommen.¹⁷⁹ Eine weitere Methode zur Wasserstofferzeugung war die Methandampfreformierung. Aus dieser Studie ging hervor, dass Bio-CNG die niedrigste Kohlenstoffintensität von ca. 20 g CO₂/kWh aufwies, während hydriertes Öl aus pflanzlichem/ Öl aus Bioabfälle die zweitniedrigste Emissionsintensität hatte. Die Elektrifizierung der Mobilität hat eine Emissionsintensität von 260 g-CO₂/kWh Stromverbrauch, auf Basis der durchschnittlichen Emissionsintensität in der EU. Das kann niedriger sein, wenn der Strom CO₂-armer erzeugt wird, bspw. wie in Frankreich¹⁸⁰ oder Norwegen.¹⁸¹

Die unteren Heizwerte von flüssigen fossilen Brennstoffen wie Diesel, Benzin und Biodiesel liegen zwischen 36 und 32 MJ/Liter, während Ethanol, das mit flüssigen fossilen Brennstoffen gemischt wird, einen niedrigeren Heizwert von 23 MJ/Liter hat. Propan und CNG werden in Entwicklungsländern wie Indien und China als Treibstoff für Busse, 3-Rad-Fahrzeuge und Autos verwendet. Sie haben einen relativ niedrigen Heizwert von 23 MJ/Liter und 13 kWh/kg (CNG wird in Tanks komprimiert). Methanol, das aus Erdgas, Bioabfällen oder sogar aus grünem Wasserstoff und abgeschiedenem CO₂ gewonnen werden kann, wird als Ersatz für flüssige fossile Brennstoffe angesehen und hat einen niedrigeren Heizwert von 16 MJ/Liter.

¹⁷⁷ Off-Road Fahrzeuge und schwere Baumaschinen

¹⁷⁸ Vgl. Gustafsson et al., 2021.

¹⁷⁹ EU durchschnitt Emissionsintensität vom Strom in 2021

¹⁸⁰ 68 g-CO₂/kWh

¹⁸¹ 26 g-CO₂/kWh

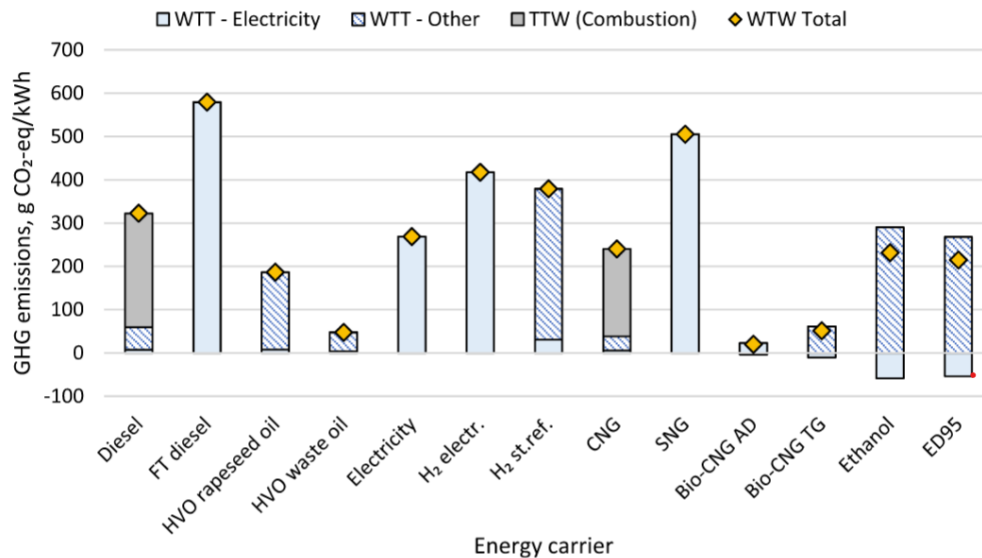


Abbildung 59: Emissionsintensität verschiedener Energieträger im Transportsektor. Emissionsintensität vom Strom von EU 27 in 2021 war 270 gCO₂/kWh.

Quelle: Gustafsson et al., 2021.

Wasserstoff, der üblicherweise aus Erdgas mit Hilfe von Dampfreformierung erzeugt wird, kann als Kraftstoff für Brennstoffzellen in LKWs und Busse verwendet werden. Wasserstoff ist das leichteste Element in der Natur und muss bei hohem Druck komprimiert werden und hat einen niedrigeren Heizwert von 33 kWh/kg. Die chemischen Eigenschaften diverser Treibstoffe sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Oktanzahl und Cetanzahl sind die Standards zur Messung der Tendenz eines Kraftstoffs, sich selbst zu entzünden. Die Oktanzahl bezieht sich auf Benzin, während die Cetanzahl sich auf Diesel bezieht. Die Oktanzahl eines Kraftstoffs gibt den prozentualen Anteil des Iso-Butens in der Mischung aus Iso-Oktan und Heptan unter Standardbetriebsbedingungen an. Die Oktanzahl gibt die Widerstandsfähigkeit gegen Selbstentzündung bei der Verwendung in einem Benzinmotor an. Aufgrund der Kompression von Luft und Kraftstoff neigt Benzin dazu, sich am Ende der Kompression durch den von der Zündkerze erzeugten Funken zu entzünden. Die Verwendung von Benzin mit niedriger Oktanzahl führt zu Problemen bei der Zündung. Der Kraftstoff mit hoher Oktanzahl braucht mehr Zeit, um zu verbrennen, bietet dem Benzinmotor aber maximale Effizienz und im Gegensatz dazu neigt Kraftstoff mit niedriger Oktanzahl dazu, sich aufgrund der Wirkung von Überhitzung und Druck leicht selbst zu entzünden.

	Gasoline/E10	Low Sulfur Diesel	Biodiesel	Propan	CNG	LNG	Ethanol/E100	Methanol	Wasserstoff
Chemische Struktur	C4 to C12 & Ethanol's 10%	C8 to C25	Methyl esters von C12 bis C22 Fettsäuren	C3H8 (Großteil) & C4H10 (minority)	CH4 (Großteil), C2H6 als inert Gas	CH4	CH3CH2OH	CH3OH	H2
Ausgangsmaterial	Erdöl	Erdöl	Soyabohnen, Speiseölabfälle	Erdöl- & Erdgasverarbeitung Nebenprodukt	Erdgas	Erdgas	Mais, Cellulose	Erdgas, Kohle	Erdgas, Wasserelektrolysis
Hoher Heizwert (MJ/liter) @15°C	34	39	36	25	15 kWh/kg	24	23	18	39 kWh/kg
Unter Heizwert (MJ/liter) @15°C	32	36	33	23	13 kWh/kg	21	21	16	33 kWh/kg
Status	Flüssigkeit	Flüssigkeit	Flüssigkeit	Komprimierte Flüssigkeit	Komprimiertes Gas	Kryogenische Flüssigkeit	Flüssigkeit	Flüssigkeit	Komprimiertes Gas
Cetane Nummer	-	40 bis 55	48 bis 65	-	-	-	0 bis 54		
Octane Nummer	84 bis 93	-	-	105	120	120	110	112	130
Flasch Punkt (°C)	-43	74	100 bis 170	-100	-185	-185	12	11	
Autoignition Temperature (°C)	257	315	150	455	540	540	422	482	565

Tabelle 10: Thermochemische Eigenschaften verschiedener Treibstoffe in Straßenverkehr.

Quelle: US Department of Energy, 2020.

Cetan ist als chemische Verbindung auch als Hexadecan bekannt. Diese Kohlenwasserstoffkette neigt dazu, sich unter Kompression spontan zu entzünden und wird daher als Cetanzahl von Hundert bezeichnet. Die Cetanzahl eines bestimmten Kraftstoffs kann als der prozentuale Anteil von n-Hexadecan in der Mischung aus n-Hexadecan und 1-Methylnaphthalin definiert werden, der für die Zündverzögerung verantwortlich ist. Sie ist das genaue Gegenteil der Oktanzahl, und alle Dieselmotorkraftstoffe werden auf der Grundlage ihres Zündverhaltens bei Kompression mit der Cetanzahl indiziert. Die Cetanzahl misst die Zündverzögerung des Kraftstoffs in einem Dieselmotor. Wenn die Cetanzahl höher ist, ist die Zündverzögerung kurz und der Kraftstoff mit einer hohen Cetanzahl wird als idealer Kraftstoff für den Dieselmotor angesehen.

Der Straßenverkehr verbrauchte 2019 mehr als 40 % der gesamten Ölnachfrage und trug damit zu etwa 75 % der gesamten Emissionen des Verkehrssektors bei.¹⁸² Das Wachstum des Sektors war seit dem Jahr 2000 für mehr als die Hälfte des gesamten Ölnachfrageanstiegs verantwortlich, und sowohl die Hersteller als auch die Prognostiker gehen davon aus, dass es noch mehr Wachstum geben wird.¹⁸³ Die verschiedenen Arten von Kraftstoffen, die im Verkehrssektor verwendet werden, sind Diesel, Benzin, Wasserstoff, CNG und die direkte Nutzung von Strom für BEVs¹⁸⁴ und PHEVs.¹⁸⁵ Die Verbrennung von Benzin, CNG aus Schiefergas und Fischer-Tropsch-Diesel aus Erdgas haben Emissionen zwischen 25 und 21 kg-CO₂/100km, während die Verbrennung von Diesel mit 18 kg-CO₂/100 km relativ CO₂-ärmer als die vorgenannten Treibstoffen ist.

¹⁸² Vgl. Our World in Data, 2020.¹⁸³ Vgl. BNEF, 2020.¹⁸⁴ Battery Electric Vehicle (E-PKWs)¹⁸⁵ Plug-in-Hybrid

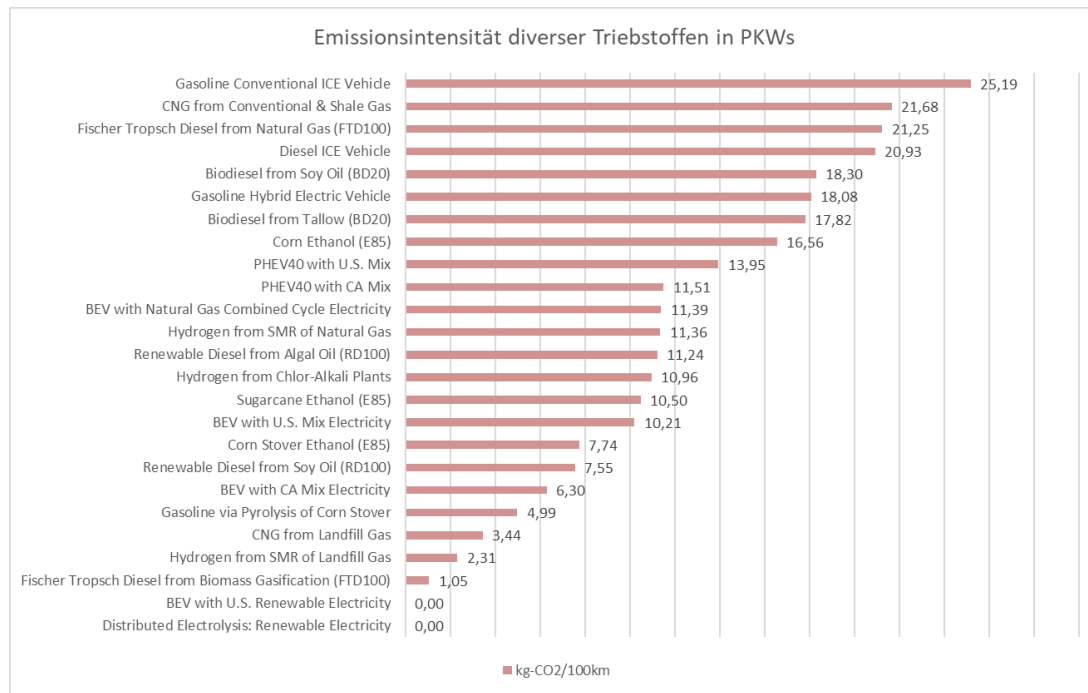


Abbildung 60: Emissionseigenschaften diverser Treibstoffe im Straßenverkehr.

Quelle: Argonne National Laboratory, GREET WTW Calculator, 2021.

Bei einem Strommix der USA sind BEVs schon 60 % CO₂-ärmer als Benzin. Fischer-Tropsch-Diesel aus der Vergasung von Biomasse, Wasserstoff aus SMR von Methan aus Mülldeponien und die Nutzung von Strom aus erneuerbarer Energie für BEVs oder FCEVs sind einige der klimafreundlichsten Kraftstoffquellen (siehe Abbildung 60).

Bestimmte Fahrzeugtypen sind umweltschädlicher als andere. Im Durchschnitt verbrauchen SUVs etwa ein Viertel mehr Energie als ein Standard-Familienauto, weil sie größer und schwerer sind und mehr Luftwiderstand erzeugen. Zwischen 2010 und 2018 führte die Zunahme von SUVs auf den Straßen weltweit zu einem Anstieg des Benzinverbrauchs um 3,3 Millionen Barrel pro Tag.¹⁸⁶ Der Anteil der SUVs hat sich in den letzten zehn Jahren verdoppelt, was zu einer Verlagerung hin zu größeren und schwereren Autos geführt hat. Infolgedessen gibt es heute weltweit mehr als 200 Millionen SUVs, gegenüber etwa 35 Millionen im Jahr 2010, was 60 % des Anstiegs der weltweiten Fahrzeugflotte seit 2010 ausmacht. Rund 40 % der jährlichen Autoverkäufe entfallen heute auf SUVs, während es vor zehn Jahren noch weniger als 20 % waren. Die Emissionen der weltweiten SUV-Flotte sind in den letzten zehn Jahren um fast 0,55 Gt CO₂ auf rund 0,7 Gt CO₂ gestiegen.¹⁸⁷ Hinzu kommt, dass die „Auslastungsrate“ (Anzahl der Passagiere pro Auto) in Industrieländern geringer ist, was zu einem niedrigerem Personenkilometer pro kWh führt. Die PKW-Auslastung¹⁸⁸ geht weiter zurück, allerdings langsamer als in den 1980er und 1990er Jahren. Die jüngsten Daten für die durchschnittliche Zahl der Fahrgäste pro Auto, einschließlich Fahrer, für die in die Stichprobe

¹⁸⁶ Vgl. Forbes, 2020.

¹⁸⁷ Vgl. Cozzi & Petropoulos, 2021.

¹⁸⁸ Anzahl von Personen pro Auto

einbezogenen Länder liegen bei etwa 1,45 Fahrgästen pro Fahrzeug.¹⁸⁹ Mögliche Gründe hierfür sind die stärkere Individualisierung der Gesellschaft, die sich in der Abnahme der Haushaltsgrößen widerspiegelt, und die Zunahme des Autobesitzes. Die Auslastungsrate in den USA hingegen wurde mit 1,5 angegeben und heute sind fast die Hälfte aller in den Vereinigten Staaten verkauften Autos SUVs.¹⁹⁰

Für die Elektromobilität bräuchten wir eine große Menge an Produktions-, Verteilungs- und Recyclinganlagen für Lithiumbatterien sowie eine Aufrüstung des Stromnetzes, um Netzausfälle zu vermeiden, wenn viele Elektrofahrzeuge gleichzeitig ans Netz angeschlossen werden. Die Herstellung und Nutzung von E-Kraftstoffen ist hingegen energieineffizient, insbesondere für PKWs. Um Autos und 3-Rad-Fahrzeuge mit komprimiertem E-Methan zu betreiben, müssen der Motor und die Kraftstofftanks modifiziert werden, und die Kosten dafür müssen von den Eigentümern übernommen werden. Die Verwendung von reinem E-Methanol in Fahrzeugen ist auf Hochleistungsfahrzeuge beschränkt, und es gibt derzeit kaum methanolbetriebene Autos auf dem Markt. Nach Berichten von DOE¹⁹¹ mischen einige Tankstellen bis zu 16 % Methanol in ihre Kraftstoffe. Solch hohe Prozentsätze verringern die Energiedichte des Kraftstoffs so sehr, dass Startschwierigkeiten und das Abwürgen des Motors für einige Autofahrer zum Problem werden.¹⁹² Laut einer Studie gäbe es keine weiteren Senkungen der NO_x Emissionen durch den Einsatz von E-Fuels in einem Mercedes A-180 und die Kohlenstoffemissionen waren sogar dreifach höher bei einem WLTC¹⁹³ Test und 1,2 höher bei RDE¹⁹⁴ Test als Fossilen Benzin.¹⁹⁵

3.3.1.2 Technische Möglichkeiten zur CO₂-Minderung

Ein Elektroauto benötigt etwa 15 kWh/100 km bis 25 kWh/100 km, während E-Mopeds, die die Benzin-Mopeds im globalen Süden ersetzen können, etwa 2,2 kWh/100 km bis 3 kWh/100 km benötigen. Ein Auto mit Benzinmotor und ein Moped/Motorrad mit Benzinmotor benötigen etwa 7 Liter Benzin pro 100 km bzw. 1,5 Liter Benzin pro 100 km, wie aus den weltweiten Durchschnittsdaten in der Literatur hervorgeht. Die Emissionsintensitäten von Benzin/Diesel liegen zwischen 2,3 kg-CO₂/Liter und 2,8 kg-CO₂/Liter. Unter Berücksichtigung dieser Zahlen und der Kohlenstoffintensität des Stroms aus dem Jahr 2021 in verschiedenen Ländern wurden Vergleiche der Kohlenstoffemissionen zwischen dem Betrieb von konventionellen Mopeds und Autos und elektrischen Mopeds und Autos mit dem aktuellen Strommix in den jeweiligen Ländern angestellt.

¹⁸⁹ In UK - 1,58; Deutschland - 1,42 und Niederlande - 1,38 Fahrgäste pro Fahrzeug

¹⁹⁰ Vgl. University of Michigan, 2022.

¹⁹¹ Department of Energy for the United States of America

¹⁹² Vgl. Top Gear, 2017.

¹⁹³ Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle

¹⁹⁴ Real Driving Emissions

¹⁹⁵ Vgl. Transport & Environment, 2021.

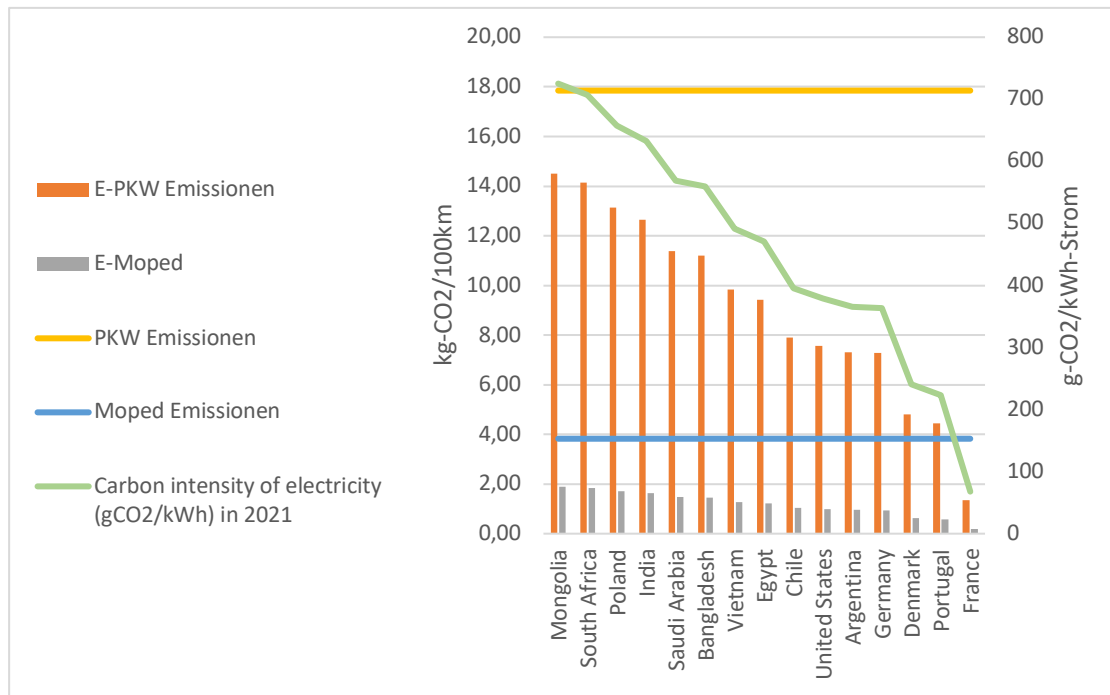


Abbildung 61: Emissionen von E-Mopeds und E-Autos in verschiedenen Ländern beladen mit derzeitigem Strommix in dem entsprechenden Land.

Die Basisemissionen für herkömmliche Mopeds und Autos liegen bei etwa 18 kg CO₂/100 km und 4 kg CO₂/100 km (siehe Abbildung 61). Wenn die Emissionen beim Fahren eines elektrischen Mopeds oder Autos, das mit dem aktuellen Strommix aufgeladen wird, niedriger sind als die oben genannten Basisemissionen, dann ist das Fahren eines Elektroautos oder E-Mopeds bereits umweltfreundlicher als das von konventionellen Autos und Mopeds. Darüber hinaus kann das Aufladen in Schwachlastzeiten oder bei Verfügbarkeit von überschüssigem Ökostrom die Emissionsintensität von E-Mobilitätslösungen verringern. Aus Abbildung 61 geht hervor, dass diese Parität in den meisten Ländern bereits erreicht wurde.

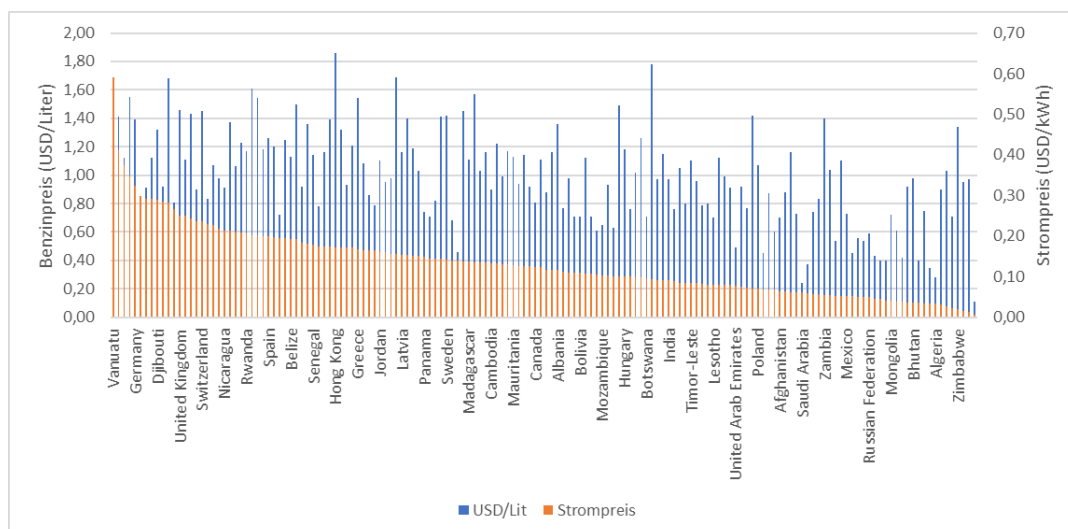


Abbildung 62: Benzinpreis und Strompreis Vergleich verschiedener Länder.

Datenquelle Benzinpreis: Statisticstimes, 2022; Datenquelle Strompreis: Cable, 2022.

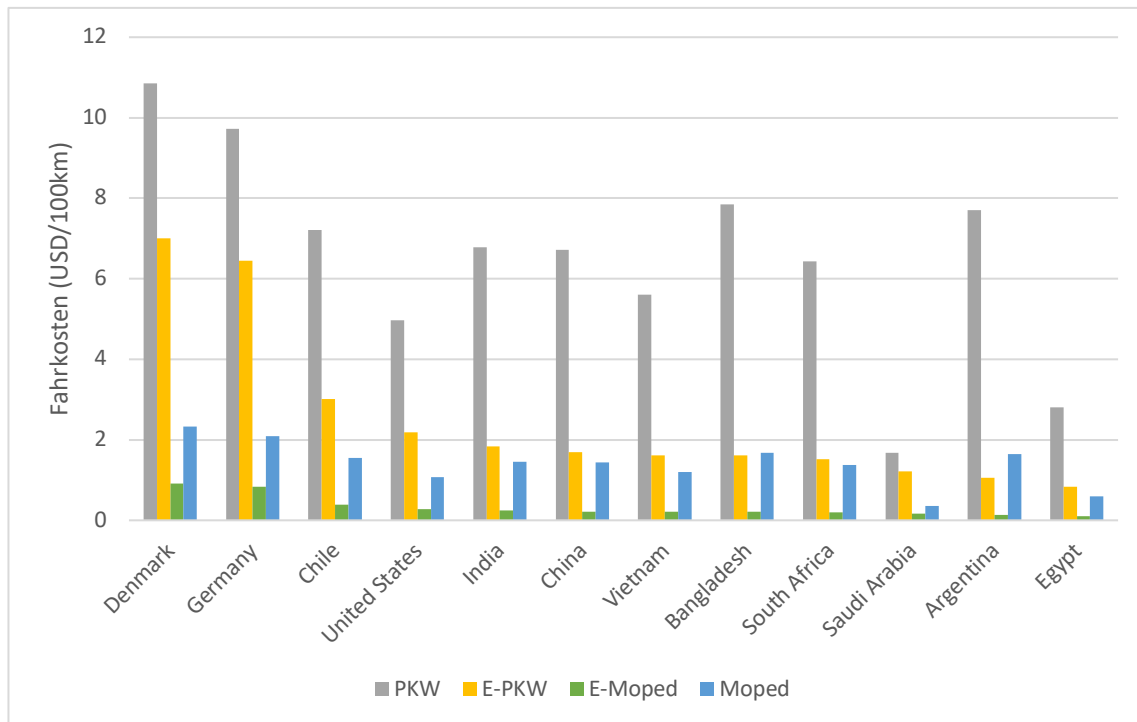


Abbildung 63: Kostenvergleich fürs Fahren von konventionellen Mopeds, Autos, E-Mopeds und E-Autos.

Quelle: IEA (2019a)

Auf der Grundlage der Benzinkosten, der Strompreise und Fahrleistungen durchschnittlicher Autos, Mopeds, E-Autos, E-Mopeds wurde die Wirtschaftlichkeit über einer 100 km langen Fahrstrecke von vorgenannten Straßenverkehrsmitteln für diverse Länder verglichen. Von den 156 Ländern, die in der Datenbank erfasst sind, war das Fahren mit einem konventionellen Auto nur in zwei Ländern billiger als mit einem E-Auto, während das Fahren mit einem E-Moped in allen Ländern billiger war als mit einem mit fossilen Brennstoffen betriebenen Moped.

Eine zweite Lösung ist die Verwendung verschiedener E-Kraftstoffe, die aus grünem Wasserstoff und CO₂ aus der Luft oder Punktquellen hergestellt werden.¹⁹⁶ Für CNG-Fahrzeuge kann das E-Methan in Tanks komprimiert und in CNG-Motoren verbrannt werden, E-Methanol kann mit Diesel oder Benzin gemischt oder in methanolgetriebenen Motoren verbrannt werden. Wasserstoff kann auch direkt für den Antrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen verwendet werden. Allerdings ist dafür ein höherer Primärenergieeinsatz erforderlich, da bei der Synthese von E-Kraftstoff mehrere Zwischenschritte erforderlich sind. Um den Upstream grünen Strombedarf, die installierten Kapazitäten von erneuerbaren Energien, Wasser, CO₂, N₂ und die Umwandlungswirkungsgrade von E-Kraftstoffen zu verstehen, wurde ein vereinfachtes Modell entwickelt. Dieses Modell betrachtet eine 7 MW Siemens SWT-7.0-154 Windturbine, die 4.000 h/a läuft. Der Strom aus dieser Anlage wird für eine unterschiedliche Anzahl von Fahrzeugen verwendet – E-Autos und E-Kraftstoff betriebene Autos.

¹⁹⁶ Erdgaskraftwerke, Kohlekraftwerke, Zement/Stahlwerke

	Strombedarf (kWh/10.000 km-a)	Wasserbe- darf (kg/10.000 km-a)	CO ₂ Bedarf/ N ₂ -Bedarf (kg/10.000km- a)	Treibstoffbedarf (kg/10.000km-a)	Well to Tank Wirkungsgrad	Well to Wheel Wirkungsgrad	Anzahl der Au- tos
E-Auto	2.000	0	0	0	-	60 %	14.000
F-Verbrenner	0	0	0	0	-	28 %	-
E-Wasserstoff	5.440	13	0	97	62 %	37 %	5.440
E-Methan	12.929	1.125	1.375	500	45 %	16 %	2.166
E-Methanol	13.725	1.575	1.925	1.400	57 %	20 %	2.040
E-Diesel	15.811	3.290	2.100	700	52 %	18 %	1.771

Tabelle 11: Primärenergie, Wasser- und Kohlendioxide-Bedarf zur Synthese verschiedener E-Fuels.

Aus der Zusammenfassung des Modells in Tabelle 11 geht hervor, dass ein Brennstoffzellenfahrzeug etwa 5.400 kWh/10.000km-a grünen Strom benötigt (Zeile „E-Wasserstoff“). Wenn es einen Verbrauch von 0,97 kg-H₂/100km hat,¹⁹⁷ und die Brennstoffzellen einen Wirkungsgrad von etwa 60 % haben, dann ergibt sich daraus ein Well-to-Wheel-Wirkungsgrad von 37 % für mit E-Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenfahrzeuge. Dies bedeutet, dass eine 7 MW Windturbine mit 4.000 Volllaststunden etwa 5.400 Brennstoffzellenfahrzeuge, jeweils mit 10.000 km/a, indirekt antreiben könnte.

Ein komprimiertes E-Methan-Auto benötigt dagegen etwa 12.930 kWh/10.000 km an grünem Strom, etwa 1.100 kg-H₂O/10.000 km-a und 1.400 kg-CO₂/10.000 km-a für die E-Methan-Synthese. Eine 7 MW Windkraftanlage mit 4.000 Volllaststunden pro Jahr kann etwa 2.040 solcher Autos antreiben. Die Power-to-Methane Lösung für PKW hat einen Well-to-Wheel-Wirkungsgrad von etwa 16 %. Diese Berechnung ist durchgeführt unter der Annahme, dass die Fahrleistung eines CNG Verbrenners ca. 5 kg-CNG/100 km beträgt.¹⁹⁸ Mit der Methanol-Route kann die vorerwähnte Windturbinen-Konfiguration etwa 2.000 Autos mit jeweils 10.000 km/a antreiben. Der Upstream grüne Strombedarf zur E-Methanolsynthese beträgt ca. 13.700 kWh/10000 km-a und benötigt im Gegensatz zu einem Elektroauto etwa 1.600 kg-H₂O/10.000 km-a und 1.900 kg-CO₂/10.000 km-a. Diese Route hat einen leicht besseren Well-to-Wheel Wirkungsgrad von 20 % als E-Methan.

Die energieintensivste Lösung gelingt mit E-Fischer-Tropsch-Fuels (EFT): laut einer Studie braucht die Synthese von Fischer-Tropsch-Fuels mittels Hochtemperatur Co-Elektrolysis ca. 22 kWh/kg-EFT.¹⁹⁹ Andere Quellen erwähnen einen Primärenergiebedarf an Strom von 25 bis 29 kWh/kg-EFT.²⁰⁰ Nimmt man einen Energiebedarf von 22 kWh/kg-EFT und eine Fahrleistung von 7 Liter-Benzin/100 km an, dann braucht ein Verbrenner 15.800 kWh Strom fürs Fahren von 10.000 km.

Der Ölverbrauch in globalen Straßenverkehr beträgt ca. 22.260 TWh/a²⁰¹ Öl-Äquivalent und diese Menge mit E-Fuels ersetzen zu können, wird 37.000 bis 49.000 TWh/a an grünem Strom benötigt.²⁰²

¹⁹⁷ Vgl. Duan et al., 2021.

¹⁹⁸ Für Mercedes Benz B 180; vgl. CNG-Europe, 2017.

¹⁹⁹ Vgl. Peters et al., 2022.

²⁰⁰ Vgl. Prognos, 2020.

²⁰¹ 43 Mio. Barrel pro Tag laut BNEF, 2020.

²⁰² Angenommen bei einer Well-To-Tank Wirkungsgrad von 60 % bis 45 % bei Synthese von E-Fuels

Darüber hinaus erfordert diese Lösung eine globale Hochskalierung von Direct Air Capture, um die von Verbrennungsmotoren ausgestoßenen CO₂-Mengen eventuell abzufangen und zu verpressen. Das Abfangen von CO₂ mittels Niedertemperatur Temperature-Swing-Absorption Direct Air Capture Verfahren benötigt ca. 180 kWh/t-CO₂ an Strom, 722 kWh/t-CO₂ an Wärme, 7 kg/ t-CO₂ an Sorbent und 118 kWh/t-CO₂ an Strom zur Komprimierung und unterirdische Verpressung vom abgeschiedenen CO₂ aus der Luft.²⁰³

In Vergleich zu diesen Lösungen, braucht ein E-Auto 2.000 kWh/10.000km-a und zur Treibstoffsynthese weder Wasser noch CO₂. Dennoch muss der Wasserverbrauch zur Förderung und Verarbeitung von Lithium nicht ignoriert werden. Jede kWh von Batteriespeicherkapazität in einem E-Auto benötigt ca. 100g Lithium und pro ton Lithium Extraktion werden 2 Millionen Liter Wasser verbraucht,²⁰⁴. Ein Nissan-Leaf hat eine 25 kWh Li-Batterie und das entspricht einem einmaligen Wasserverbrauch von 5.000 kg bei der Förderung von Lithium zur Batterieherstellung und zwar in sehr trockenen Regionen der Welt wie der Atacama in Chile. Der genaue Bedarf an Rohwasser für die Gewinnung von Lithium und die Herstellung von Batterien bleibt jedoch aufgrund mangelnder Transparenz seitens der Bergbauunternehmen und Batteriehersteller unklar.

Ein Neudenken der Mobilität wäre global notwendig, denn der Ersatz von Verbrennern durch Elektrofahrzeuge oder mit E-Kraftstoff betriebenen Fahrzeugen birgt auch technisch-wirtschaftliche und umweltpolitische Hindernisse. Daher gibt es keine „Silver Bullet“ Lösung. Die Versorgung der Bestandsflotte mit E-Fuels und das Ersetzen von Verbrennern durch E-Autos/E-Mopeds hat einen steigenden Bedarf an Ressourcen wie grünem Strom, Lithium, Ladeinfrastruktur zu Folge. Lieferketten für E-Fuels sind auch begrenzt und führen zu neuen geopolitischen Abhängigkeiten.

3.3.2 Bahnverkehr

Die Schiene ist einer der energieeffizientesten Verkehrsträger: Sie ist für 9 % des weltweiten motorisierten Personenverkehrs und 7 % des Güterverkehrs verantwortlich, verbraucht aber nur 3 % der Energie im Verkehr.²⁰⁵ Die durchschnittliche Intensität des Schienenverkehrs liegt weltweit bei 63 g-CO₂/Passagier-km. Der Schienenverkehr verbraucht pro Tonne beförderter Fracht 80 % weniger Energie als der Lkw und hat gegenüber dem Pkw einen Vorteil von vier zu eins, was die Emissionsintensität angeht. Infolgedessen entfielen 2019 nur 4 % der weltweiten Emissionen der Verkehrsin-
dustrie auf die Schiene.²⁰⁶

²⁰³ Vgl. Madhu et al., 2021.

²⁰⁴ Vgl. Danwatch 2019; Xanders, 2019.

²⁰⁵ Vgl. IEA, 2021.

²⁰⁶ Vgl. BCG, 2022.

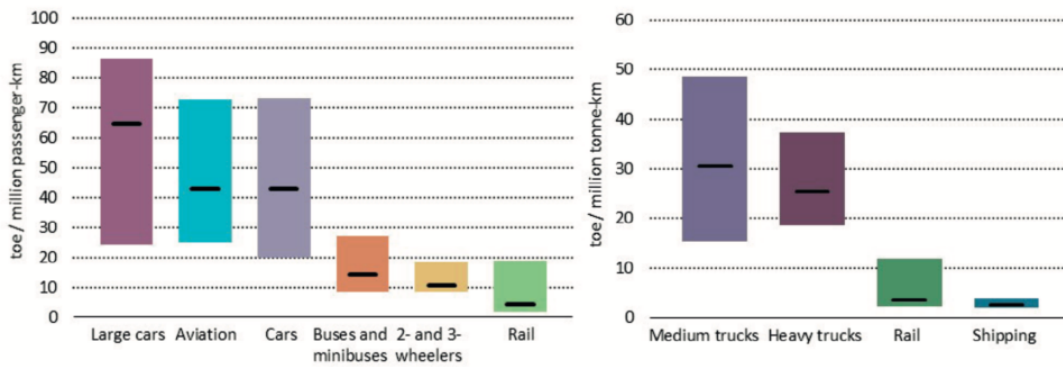


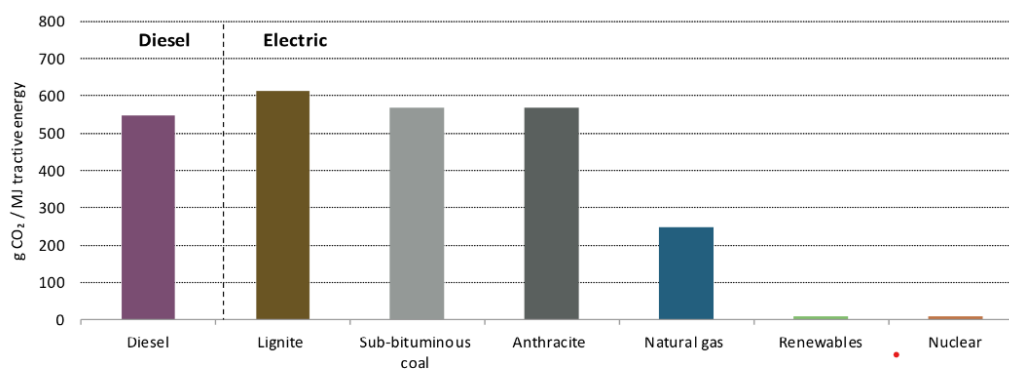
Abbildung 64: Energieverbrauch von Transportarten aus dem Jahr 2017. Links: Personenverkehr in TOE (Tonnen Öl equivalent) pro Millionen Personenkilometern, rechts: Frachtverkehr in TOE pro Millionen Tonnenkilometern.

Quelle: IEA (2019a), CarbonBrief (2019)

3.3.2.1 Quellen der CO₂-Emissionen

Gemäß des GHG-Protokolls können die Emissionen des Bahnsektors in die folgenden drei Klassen unterteilt werden:

- Scope-1-Emissionen umfassen die direkten Emissionen von Eisenbahnunternehmen aus ihren Zügen, Maschinen und Gebäuden. Sie werden vor allem durch fossile Brennstoffe erzeugt, die Lokomotiven, Waggons und Lastwagen des Unternehmens antreiben
- Scope-2-Emissionen entstehen indirekt durch den Kauf von nicht erneuerbarem Strom, der nicht nur für den Antrieb von Lokomotiven, sondern auch für den Verwaltungsbetrieb, den Betrieb von Bahnhöfen, die Wartung und andere Aktivitäten verwendet wird.
- Scope 3-Emissionen umfassen andere indirekte THG-Emissionen aus der Wertschöpfungskette von Eisenbahnunternehmen, wie z. B. die vorgelagerten Emissionen, die bei der Produktion von Lokomotiven und rollendem Material sowie beim Bau der Eisenbahninfrastruktur entstehen.



Average well-to-wheel (WTW) carbon intensities for diesel powertrains and electric powertrains using various primary sources, in grammes of CO₂e per megajoule. Source: IEA 2019.

Abbildung 65: Well-to-Wheel-Emissionsintensitäten verschiedener Zugfahrtantriebe; Quelle: IEA 2019

Die direkten oder indirekten Emissionen von Diesel und elektrischen Zügen sind in Abbildung 65 dargestellt. Ein Diesel-Zug verursacht ca. 550 g-CO₂/MJ-Zugsenergie, Stromantriebszüge, die mit Strom aus Kohlekraftwerken angetrieben werden sind fast genauso klimaschädlich wie Diesel. Die besseren Lösungen zur Elektrifizierung der Schienenverkehr sind Strom aus Erdgas und erneuerbaren Energieanlagen. Nach Angaben der Internationalen Energieagentur werden im Jahr 2020 55 % der von der weltweiten Bahnindustrie verbrauchten Energie durch Diesel erzeugt (85 % davon für den Antrieb der Züge), 44 % durch Strom und 1 % durch Biokraftstoffe.

3.3.2.2 Technische Möglichkeiten zur CO₂-Minderung

Die Verringerung der Scope-1-Emissionen, die aus der Verbrennung von Dieselmotoren resultieren - etwa 300 Millionen Tonnen Treibhausgasemissionen pro Jahr -, wird daher für die Nachhaltigkeit der Branche entscheidend sein. Wenn der globale Schienenverkehr bis zum Jahr 2050 Netto-Null-Emissionen erreichen soll, muss er seinen Dieserverbrauch auf nur 4 % des gesamten Energieverbrauchs reduzieren und seinen Antrieb entweder durch erneuerbare Elektrizität oder eine andere Form des Antriebs ersetzen.²⁰⁷ Wenn die Bahn expandieren und wachsen soll, muss sie weiterhin Fahrgäste und Frachtkunden anziehen, die ihren eigenen Emissionsfußabdruck reduzieren wollen, da der Schienenverkehr bessere km-Passagier/kWh Werte hat als PKWs oder LKWs.²⁰⁸

Bei der Energieeffizienz von Zügen gibt es große regionale Unterschiede (siehe Abbildung 66). Personenzüge sind in den USA und der EU weniger energieeffizient als in Asien, was in erster Linie auf die geringere Auslastung zurückzuführen ist.

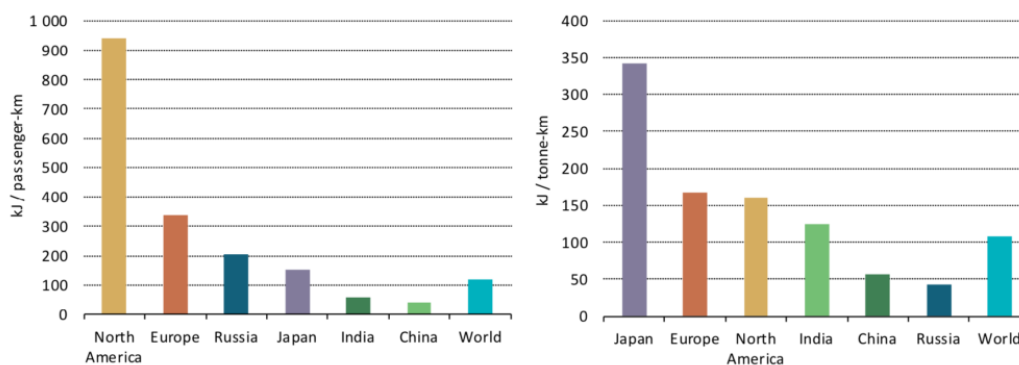


Abbildung 66: Fahrleistung von Passagier- und Güterbahnverkehr in diversen Ländern.
Quelle: IEA (2019a) S. 54

Im Jahr 2016 waren Elektrolokomotiven für 70 % der gefahrenen Personenkilometer und 48 % der transportierten Frachtkilometer verantwortlich.²⁰⁹ Der Anteil der Diesellokomotiven bleibt jedoch weltweit hoch. Etwa 50 % aller Züge in Westeuropa und Asien sind dieselangetrieben, 75 % sind es

²⁰⁷ Vgl. BCG, 2022.

²⁰⁸ Passagierzug 2,83 Passagier-km/kWh; PKW 1,41 Passagier-km/kWh

²⁰⁹ Vgl. BCG, 2022.

im Nahen Osten und Afrika und 99 % in Amerika, wobei der höchste Anteil an Schienenelektrifizierung in Korea mit rund 85 % zu verzeichnen ist. Durch die weitere Elektrifizierung des Schienenverkehrs und eine Förderung des Personentransports von Bahnen könnten Bahnen effizienter und klimafreundlicher transportieren. Die Reise auf der Last-Mile kann mit Hilfe von Fahrrädern, Shared Mobilität, Bussen oder sicheren Fußgängerzonen durchgeführt werden.

Die Infrastruktur für den Nah- und Hochgeschwindigkeitsverkehr wurde in den letzten zehn Jahren rasch ausgebaut und bildet die Grundlage für einen bequemen, emissionsarmen Verkehr innerhalb und zwischen Städten. China ist führend bei der Einführung von Hochgeschwindigkeitsstrecken mit einer beispiellosen Expansion. In Indien, das nach China über die zweitlängste Eisenbahninfrastruktur verfügt, wird eine umfangreiche Elektrifizierung von Eisenbahnstrecken vorgenommen. China hatte im Jahr 2017 45.000 km Hochgeschwindigkeitsbahnverkehr auf Routen zwischen Taipei-Kaoshiung, Wuhan-Guangzhou, Beijing-Shanghai ausgebaut.²¹⁰

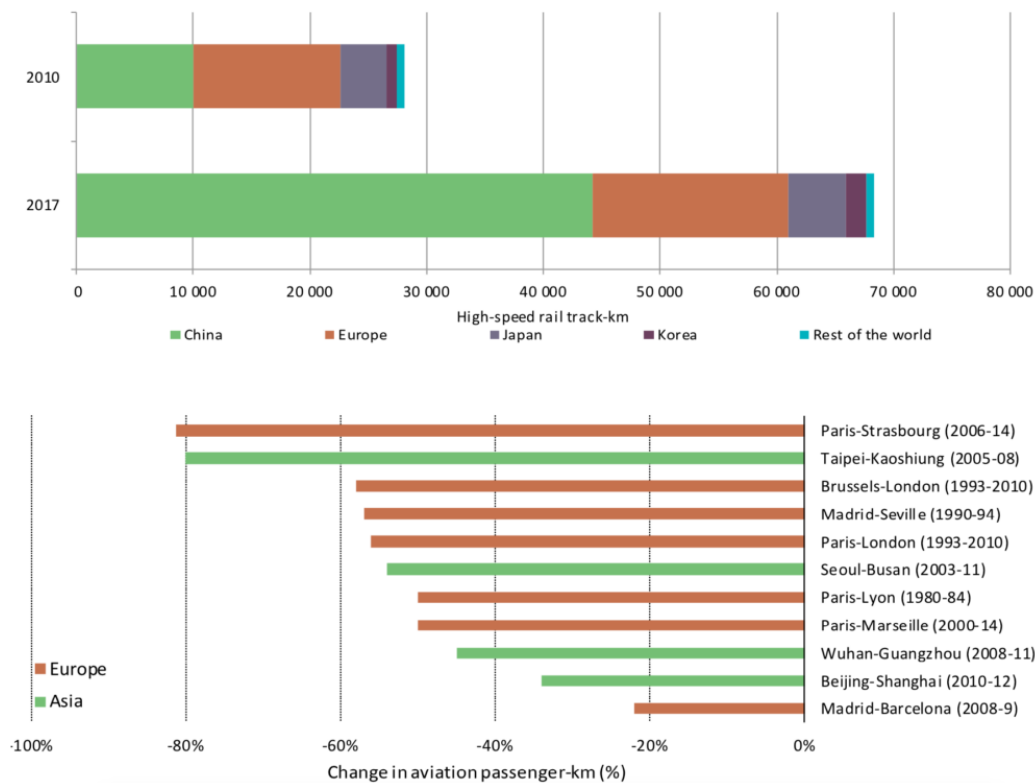


Abbildung 67: Ausbau von Hochgeschwindigkeitsschienen in Europa und China (oben) Quelle: IEA (2019a) S.31. Reduktion im Flugverkehr wegen des Ausbaus von Hochgeschwindigkeitsschienen in Europa und China (unten). Quelle: IEA (2019a) S. 99

Daher gab es aufgrund dieser Art von Schienenverkehr eine Reduktion von 80 % bis 30 % in Luftfahrtpassagier-km (siehe Abbildung 67). In Europa gab es aufgrund der Paris-Strasbourg Route eine Reduktion von 80 % in Flugpassagier-km. Ein Ausbau von solchen Hochgeschwindigkeitsbahnverkehr kann die Abhängigkeit auf Kurzstreckflugverkehr reduzieren.

²¹⁰ Im Vergleich dazu während desselben Zeitraums wurden in Europa ca. 10.000 km Hochgeschwindigkeitsschienen aufgebaut

3.3.3 Luftverkehr

3.3.3.1 Quellen der CO₂-Emissionen

Fast 88 Millionen Arbeitsplätze waren weltweit in der Luftfahrt und dem damit verbundenen Tourismus angesiedelt, bevor Covid-19 die Branche traf. Davon arbeiteten 11,3 Millionen Menschen direkt in der Luftfahrtindustrie. Weltweit liegt die „Auslastungsrate“ im Luftfahrtsektor bei 83 % und ist damit die höchste unter den anderen Verkehrsträgern. 1.478 Fluggesellschaften betreiben eine Flotte von 33.299 Verkehrsflugzeugen, die 3.780 Flughäfen über ein Streckennetz von mehreren Millionen Kilometern bedienen, das von 162 Flugsicherungsorganisationen verwaltet wird. Im Jahr 2019 wurden durch Flüge weltweit 915 Millionen Tonnen CO₂ produziert und es flogen weltweit 4,5 Milliarden Passagiere.²¹¹

Der Kraftstoffverbrauch aller kommerziellen Flugzeugen im Luftverkehrssektor betrug im Jahr 2019 ca. 360 Milliarden Liter vor Anfang der Pandemie und im Jahr 2020 lag der Verbrauch bei 216 Milliarden Litern.²¹² Das entspricht einem Energiebedarf von 3.312 TWh/a im Jahr 2019 und 1.987 TWh/a im Jahr 2021.²¹³

Geht man von einem Windpark aus, der mit einer Volllast von 6.000 Stunden pro Jahr betrieben wird, und berücksichtigt man den Wirkungsgrad von E-Fischer-Tropsch-Fuels von 52 % bei der Umwandlung vom Well-to-Tank, so muss der Windpark etwa 6.369 TWh pro Jahr sauberen Strom erzeugen, um den Treibstoffbedarf im Jahr 2019 vor der Pandemie abdecken zu können. Das entspricht einer installierten Leistung von ca. 1 TW. Um die Größe der Aufgabe zu verstehen, muss man bedenken, dass die derzeit weltweit installierte Gesamtkapazität der Windkraft etwa 0,75 TW beträgt. Die Beschreibung der erforderlichen zusätzlichen Infrastrukturen wie CO₂-Abscheidung und -Lieferung, Transport, Raffinerien, Liefertanker, Arbeitskräfte, Projektdauer und Logistik für ein derartiges Großprojekt würde den Rahmen dieses Artikels sprengen.

	Boeing 747-200B	Boeing 777-300ER	Airbus A350-1000
kg-Treibstoff/Passagier-100km	4,96	3,65	2,93
kg-Treibstoff/Payload-100km	4,56	1,65	1,51

Tabelle 12: Fahrleistung verschiedener Flugzeugtypen für eine 9166 km Flugreise zwischen Hongkong und Frankfurt.

Quelle: Burzlaff, 2017.

Laut einer Studie von HAW Hamburg, liegen die „Fahrleistungen“ moderner Flugzeuge im Durchschnitt bei ca. 3,3 kg-Treibstoff/Passagier-100 km. Die Flugleistungen diverser Flugzeugtypen wie

²¹¹ Vgl. Air Transport Action Group, 2020.

²¹² Vgl. Statista, 2021; 1 US Gallone = 3,79 Liter

²¹³ Der Energiedichte 9,2 kWh/Liter

Boeing 747-200B, Boeing 777-300ER & Airbus A350-100 gemessen über die Strecke von Hongkong-Frankfurt sind aus Tabelle 12 zu ersehen.

Auf Basis der gravimetrischen Energiedichte hat Aviation Gasoline eine Energiedichte von 12,14 kWh/kg und eine volumetrische Energiedichte von 8,61 kWh/Liter. Wegen seiner relativ höheren Dichte hat Kerosin die höchste volumetrische Energiedichte von 9,74 kWh/ Liter. Die Eigenschaften von drei Arten von Treibstoffen sind Tabelle 13 zu entnehmen.

Treibstoffe	Dichte (kg/Liter)	Gravimetrische Energiedichte (kWh/kg)	Volumetrische Energiedichte (kWh/Liter)
Aviation Gasoline	715	12,14	8,61
Jet Fuel - Widecut	762	12,09	9,22
Kerosine	810	12,02	9,74

Tabelle 13: Dichte, gravimetrische und volumetrische Energiedichte verschiedener Flugtreibstoffe.

Quelle: Chevron, 2007.

3.3.3.2 Technische Möglichkeiten zur CO₂-Minderung

In diesem Kapitel wird die Ersetzung von Flugkraftstoff durch E-Fischer-Tropsch-Kraftstoff diskutiert. Da der durchschnittliche Treibstoffverbrauch eines Passagierflugzeugs etwa 3,3 kWh/Passagier-km beträgt,²¹⁴ würden für die EFT-Synthese elektrische Energie in der Größe von 75 kWh/Passagier-100 km benötigt, wenn man von einem Strombedarf von 22 kWh/kg-EFT durch Co-Elektrolyse von CO₂ und H₂O zur EFT-Synthese ausgeht.²¹⁵

3.3.4 Schiffsverkehr

3.3.4.1 Quellen der CO₂-Emissionen

Vergleicht man die Daten zur Welthandelsflotte aus dem Jahr 2021 mit denen aus dem Jahr 2016, so sind die drei größten Schiffsbesitzerländer dieselben geblieben: Griechenland, Japan und China. Insgesamt umfasst die Welthandelsflotte 2.116.401Tausend DWT (Deadweight Tonnage) und 53.973 Schiffe über 1.000 BRT. Zu den erfassten Schiffen gehören alle seegängigen Handelsschiffe mit Antrieb und einer BRT von 1.000 und mehr, einschließlich Offshore-Bohrschiffe und schwimmende Produktions-, Lager- und Entladeeinheiten (FPSOs). Militärschiffe, Yachten, Wasserfahrzeuge, Fischereifahrzeuge sowie feste und mobile Offshore-Plattformen und -Schiffe sind ausgeschlossen.

²¹⁴ Vgl. Burzlaff, 2017.

²¹⁵ Vgl. Peters et al., 2022.

Emissionen (g/kg-Treibstoff)	Heavy Fuel Oil (HFO)	Marine Gas Oil (MGO)
PM	3	2
NO _x	45	47
CO	4	3
CO ₂	3210	3180
SO ₂	24	0,7

Tabelle 14: Treibhausgasemissionen von Schiffahrtstreibstoffen.

Größere Schiffe, wie z. B. Tanker, fahren mit geringerer Geschwindigkeit und haben einen besseren Kraftstoffverbrauch, aber auch eine größere DWT, was zu einem höheren Nettokraftstoffverbrauch führt. Generell kann man auch sagen, dass große Schiffe effizienter sind als kleinere, d.h. der Energieverbrauch pro Transportarbeit sinkt mit der Größe. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die benetzte Fläche mit der Länge proportional zunimmt, während die Ladekapazität mit der Länge im Kubus zunimmt, so dass der Energiebedarf langsamer wächst als die Transportkapazität.²¹⁶ Die Energieverbräuche als eine Funktion der Geschwindigkeit verschiedener Arten von Schiffen sind in Abbildung 68 graphisch dargestellt. Das größere Schiff kann auch mit höheren Geschwindigkeiten fahren, bevor es mit dem Problem des großen Wellenwiderstands konfrontiert wird.

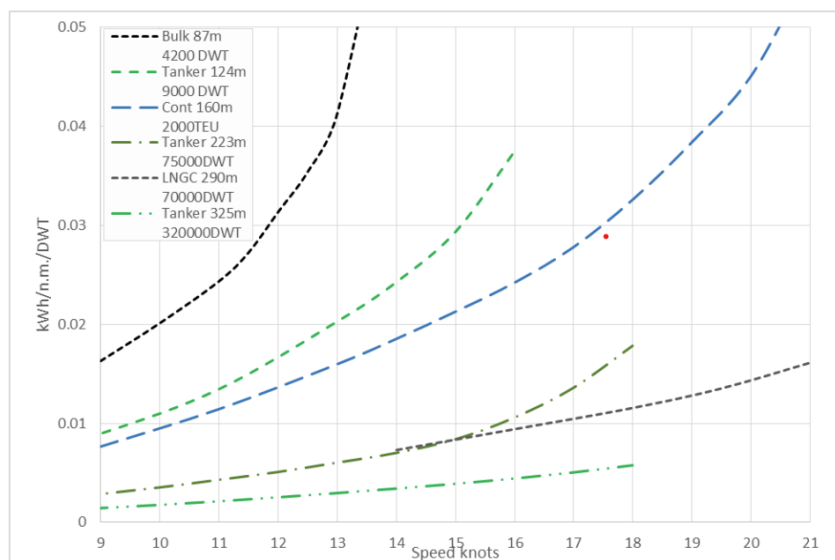


Abbildung 68: Die Energieverbräuche als eine Funktion der Geschwindigkeit verschiedener Arten von Schiffen sind.

Quelle: von Knorring et al., 2016.

²¹⁶ Vgl. von Knorring et al., 2016.

3.3.4.2 Technische Möglichkeiten zur CO₂-Minderung

Auf Basis von diesen Daten wurden die grünen Strombedarfe zur Synthese diverser E-Fuels pro 10.000 km/DWT und bei einer Fahrleistung von 1,64 kWh/100 km-DWT²¹⁷ in Tabelle 15 ausgeführt. Der geringste Strombedarf ergibt sich bei der E-Wasserstoffschiene, wobei hier der Energiebedarf zur Komprimierung oder Verflüssigung von Wasserstoff nicht mitberücksichtigt wurde. Die Erzeugung von anderen Treibstoffen wie z.B. E-Methan, E-Ammoniak und E-Fischer-Tropsch-Fuels benötigt 292 bis 366 kWh/(10.000 km-DWT) grünen Stroms. Die Wasser- und CO₂-Verbräuche zu deren Synthese sind in Tabelle 15 aufgeführt. Der höchste Wasser- und CO₂-Bedarf liegt bei der Synthese von E-Fischer-Tropsch-Fuels vor.

	E-Wasserstoff	E-Methan	E-Methanol	E-Ammoniak	EFT-Fuel
Strombedarf kWh/(10.000km-DWT)	265	366	292	348	317
Wasserbedarf kg/(10.000km-DWT)	0,56	29	33	51	66
CO ₂ -Bedarf/ N ₂ -Bedarf kg/(10.000km-DWT)	0	35	41	26	42

Tabelle 15: Strom, Wasser & CO₂ Bedarf zur Synthese verschiedener E-Fuels für die Schifffahrtsindustrie.

Es gibt einige Maßnahmen zur Reduktion wie die Verwendung von Drachen oder Flettner-Rotoren für den Schiffsantrieb, aber ihre Nutzung bleibt in der modernen Schifffahrt weitgehend unpraktiziert. Dennoch war die Nutzung von Seewinden für die Schifffahrt in der vorindustriellen Welt nicht unüblich. Ein Unternehmen versucht, dies zu ändern, indem es den bescheidenen Drachen zu neuen Höhenflügen verhilft. Das von ehemaligen Airbus-Ingenieuren gegründete französische Technologieunternehmen Airseas hat den „Seawing“ erfunden, einen 1000 m² großen Tragflügel, der laut seiner Website die Windkraft nutzt, um 90 Tonnen Zugkraft zu erzeugen. Schätzungen zufolge könnten dadurch der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen von Frachtschiffen um 10 bis 40 % gesenkt werden.²¹⁸

3.3.5 Anwendungsbeispiele

Der weltweite Markt für Elektromotorräder wird bis 2028 voraussichtlich 37 Milliarden USD erreichen und von 2022 bis 2028 mit einer kumulativen jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 13 % wachsen.²¹⁹ Elektroroller bieten eine kostengünstigere Mobilität auf der letzten Meile. Die Nutzung von Elektromotorrädern nimmt in den Schwellenländern zu. So stieg beispielsweise der Absatz von Elektromotorrädern in Indien im Zeitraum 2019-20 um 16,5 %. Die indische Regierung hat

²¹⁷ 0,03 kWh/nm/DWT

²¹⁸ Vgl. Airseas, 2022.

²¹⁹ Vgl. Yahoo Finance, 2023.

Steuererleichterungen eingeführt, um die Nutzung von Elektrofahrrädern zu fördern. Die Waren- und Verkaufssteuer in Indien (GST) auf Elektrofahrräder wurde von 12 % auf 5 % gesenkt. Branchenexperten zufolge bewegen sich die meisten der in Indien und China von den großen Anbietern verkauften Elektro-Zweiräder aufgrund des Konsumverhaltens und der aktuellen Fahrbedürfnisse im Bereich von 400 bis 900 USD.²²⁰ So bedienen beispielsweise Unternehmen wie Hero Electric, Pure EV, Okinawa, Ampere und TVS das Economy-Segment auf dem indischen Markt. In ähnlicher Weise wird der chinesische Markt von Elektromotorrädern der Hersteller Yadea, Jiangsu Xinri und Luyuan dominiert.

Für Anwendungen, bei denen Platz- und Gewichtsbeschränkungen den Einsatz von Batterien einschränken, wie z. B. in der Schifffahrt und der Luftfahrt, wird die Verwendung von grünen Wasserstoffderivaten eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung dieser Industrien spielen. Beispielsweise hat Maersk 19 Transportschiffe bestellt, die mit grünem Methanol fahren können. Die sechs Schiffe werden von Hyundai Heavy Industries gebaut und haben eine Nennkapazität von ca. 17.000 Containern.²²¹ Sie verfügen über Dual-Fuel-Motoren, die mit grünem Methanol betrieben werden können. Maersk hat eine Vereinbarung mit dem Unternehmen SunGas unterzeichnet, das grünes Methanol aus Holz- und Forstwirtschaftsabfällen herstellen wird.

Nachhaltiger Flugkraftstoff (Sustainable Aviation Fuel, SAF) ist eine Alternative zu herkömmlichem fossilem Flugkraftstoff, der aus biologischen und nicht-biologischen Ressourcen hergestellt wird. Die verschiedenen Rohstoffe, die zur Herstellung von SAF verwendet werden, können sowohl aus pflanzlichen als auch aus tierischen Materialien stammen und reichen von Speiseöl und Pflanzenölen über landwirtschaftliche Rückstände bis hin zu Siedlungsabfällen.²²² Unter den wichtigsten Unternehmen für nachhaltige Flugkraftstoffe ist der finnische, Raffineriebetreiber Neste das weltweit führende Unternehmen und auf dem besten Weg, der weltweit größte Anbieter von erneuerbaren Kraftstoffen mit globalen Kapazitäten und Produktionsstandorten in Nordamerika, Asien und Europa zu werden. Zu den Fluggesellschaften, die mit dem Kraftstoff von Neste fliegen, gehören drei der größten US-Fluggesellschaften: Alaska Airlines, American Airlines und JetBlue Airways. World Energy ist ein wichtiger SAF-Lieferant in den USA. Das Unternehmen, das seit mehr als zwei Jahrzehnten führend in der Produktion und dem Vertrieb von kohlenstoffarmen Kraftstoffen ist und die weltweit erste und in Amerika einzige SAF-Produktionsanlage im kommerziellen Maßstab betreibt, plant, bis 2024 jährlich 150 Millionen Gallonen SAF zu produzieren. Weltweit macht SAF immer noch weniger als 0,1 % des Flugkraftstoffs aus und kostet etwa viermal so viel wie Kerosin.²²³

²²⁰ Vgl. GlobeNewswire, 2022.

²²¹ Vgl. Maersk, 2022.

²²² Vgl. Earth.Org, 2022

²²³ Vgl. Bloomberg, 2021.

3.3.6 Entwicklungsrelevanz

Der globale Verkehrssektor ist durch seinen Beitrag zu erhöhten Feinstaub- (PM_{2,5}), Ozon- und Stickstoffdioxidkonzentrationen eine Hauptursache für diese Gesundheitsbelastung. Der Verkehr erzeugt Auspuffemissionen, Verdunstungsemissionen, die Wiederaufwirbelung von Straßenstaub und Partikel durch Bremsen und Abrieb der Reifen. Weitere wichtige gesundheitliche Auswirkungen des Sektors sind Lärm, Beeinträchtigung der körperlichen Aktivität und Verkehrsunfälle. Moderne Diesel verfügen hingegen über Abgasreinigungsanlagen, die so leistungsfähig sind, dass der Feinstoffgehalt am Auspuff unter dem der Ansaugluft in belasteten Städten liegt. In Städten wie Jakarta, Shanghai, Neu-Delhi, Riyad, Seoul und Lahore, besteht daher ein höheres Risiko für die Einwohner.²²⁴

Ein strategischer Umstieg auf Elektromopeds, Elektrobusse, die Elektrifizierung des Schienenverkehrs und eine absolute Reduzierung des privaten Autobesitzes durch Kohlenstoffsteuern und höhere Parkgebühren können dazu beitragen, die gefährlichen Emissionen in den Städten von Entwicklungsländern zu verringern. Neue Mobilitätsdienste wie Carsharing, Bike-Sharing und autonomer Verkehrsmittel könnten die Nutzung von Privatfahrzeugen, Emissionen und die Luftverschmutzung reduzieren. Die Zusammenarbeit zwischen Behörden, dem Privatsektor und Gemeinden ist der Schlüssel zur Verbesserung der Luftqualität und einer sauberen Mobilität. Beispielsweise, in Helsinki wurde im Rahmen des HOPE-Projekts die App Green Path entwickelt, die Radfahrern und Fußgängern den Weg zu weniger verschmutzten Routen weist. Die App nutzt Echtzeitdaten zur Luftqualität und eine Datenbank, die von der Bevölkerung mitgestaltet wird, um eine gesündere Mobilität zu fördern. Die Stadt Bielefeld in Deutschland hat eine Strategie festgelegt, die vorsieht, dass bis zum Jahr 2030 nur noch 25 % der lokalen Fahrten mit dem Auto zurückgelegt werden sollen. Zu den Maßnahmen gehören Investitionen in die Infrastruktur und die Förderung des Rad- und Fußverkehrs. Die Städte erforschen auch neue Möglichkeiten, wie die Einwohner besser auf öffentliche Verkehrsmittel zugreifen können. Im Rahmen des INNOAIR-Projekts in Sofia, Bulgarien werden Elektrobusse eingeführt, die Fahrpläne und Routen auf der Grundlage von Fahrgastanfragen in einer App als Alternative zu kurzen Autofahrten einhalten. China ist laut ARK Invest auf dem besten Weg, einer der größten MaaS-Märkte der Welt zu werden. Mobile App-basierte Ridesharing-Dienste sind in China schnell gewachsen, ebenso wie die städtische Bevölkerung. ARK schätzt, dass der Markt für MaaS in China bis 2030 auf 2,5 Billionen Dollar ansteigen könnte.²²⁵ China ist besonders geeignet für MaaS, da die Mehrheit der Bevölkerung keinen Führerschein hat,²²⁶ das Durchschnittseinkommen im Verhältnis zu den Fahrzeugpreisen niedrig ist und es schwierig ist, in China ein Auto zu bekommen. Angesichts der zunehmenden Urbanisierung fallen die meisten Wege in die Kategorie der Mikromobilität und sind daher ideale Kandidaten für die Nutzung von Fahrrädern und Rollern. In den USA sind etwa 60 % aller Fahrten 5 Meilen oder weniger lang, und der Markt für Mikromobilität

²²⁴ Vgl. IQAir, 2022.

²²⁵ Vgl. ARK Invest, 2017.

²²⁶ 80 %

wird laut McKinsey bis 2030 einen Wert von 200 bis 300 Mrd. USD haben.²²⁷ Seit dem Jahr 2017 haben Investoren weltweit 14 Mrd. USD an Eigenkapital in Start-ups im Bereich Mikromobilität investiert. Abbildung 69 zeigt verschiedene wachsenden Firmen in den USA und weltweit, die Mobilität als Service anbieten.

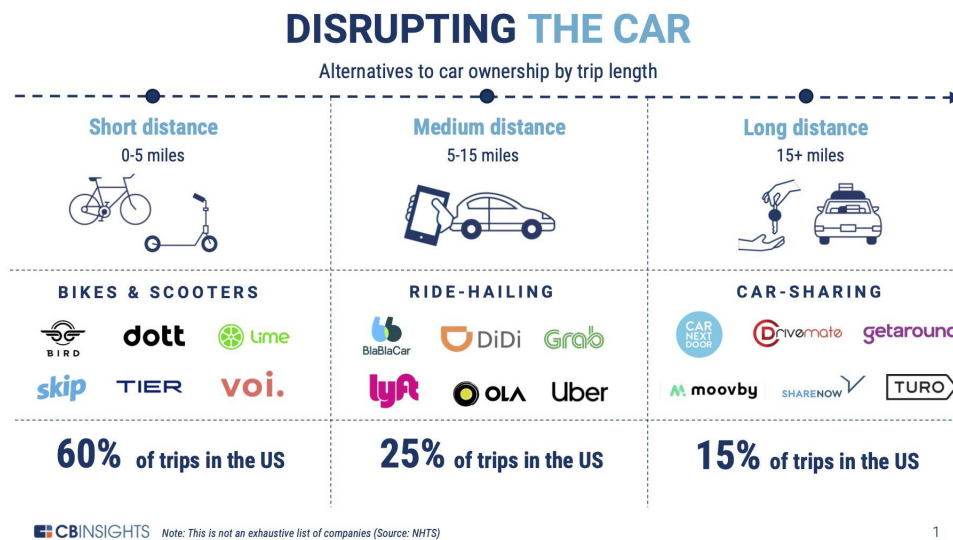


Abbildung 69: Mobilität als Serviceanbieter für diverse Fahrstrecken.

Quelle: CSBInsights, 2021.

Männer und Frauen haben unterschiedliche Reisemuster. Die Arbeitsmarktbeteiligung von Frauen ist geringer als die von Männern und Frauen übernehmen 75 % der unbezahlten Pflegearbeit in der Welt.²²⁸ Das bedeutet, dass Frauen eher mehrere, kürzere Strecken zurücklegen, während sie Einkäufe transportieren und/oder Kinder oder ältere Familienmitglieder begleiten. Bei den Fahrten von Männern handelt es sich eher um Einzelfahrten auf dem Weg zur und von der Arbeit. Das bedeutet, dass die Verkehrsnetze den Bedürfnissen von Frauen nach mehreren, kürzeren Fahrten außerhalb der Peak Reise Zeiten meistens nicht gerecht werden.²²⁹ Die Angst vor Belästigung und Angriffen führt auch dazu, dass sich Frauen mehr als Männer Gedanken darüber machen, welche Strecken und zu welcher Zeit sie diese fahren. Öffentliche Verkehrsknotenpunkte und Bahnhöfe sind nicht immer für Personen ausgelegt, die mit Kindern, Kinderwagen und Lebensmitteln reisen oder Personen mit eingeschränkter Mobilität begleiten, insbesondere in Entwicklungsländern.

Fast 53 % der ÖPNV-Nutzer in Deutschland sind Frauen, weltweit liegt der Anteil sogar bei 66 %. Ist ein funktionierendes multimodales Verkehrssystem nicht vorhanden, müssen Frauen die Mopeds oder Verbrenner nutzen – auf Kosten der Umwelt. Ansonsten bleiben die Frauen zuhause und folglich verpassen sie Weiterbildungschancen oder Jobs. Deshalb muss die Infrastruktur auch auf das Pendlerverhalten von Frauen abgestimmt werden. Die Sensibilisierung für Geschlechterfragen wird

²²⁷ Vgl. CSBInsights, 2021.

²²⁸ Vgl. OXFAM International, 2021.

²²⁹ Vgl. Ramboll, 2021.

eine sicherere Atmosphäre für Frauen in öffentlichen Verkehrsmitteln, auf Fußgängerzonen und Fahrradrouten schaffen. Dies wird Frauen bessere Arbeitsplätze, Bildung und Zugang zu medizinischer Versorgung bieten.

Die Elektrifizierung ist keine praktikable Lösung für die anderen „Hard-to-Abate“-Sektoren wie die Luftfahrt und die Schifffahrt, wohingegen die E-Treibstoffe eine Lösung sein könnten. Ein massiver Einsatz von Wind- und Photovoltaikparks, Elektrolysestationen, Raffinerien und Lieferketten für E-Kraftstoffe kann dazu beitragen, die Luft- und Schifffahrtsflotten mit dem benötigten Treibstoff zu versorgen. Die Entwicklung eines solchen Großprojekts zum Antrieb von Verbrennungsmotoren oder Turbinen kann Arbeitsplätze in Afrika, Lateinamerika und Asien schaffen. Allerdings bedeutet die Ausweitung solcher Projekte auch, dass die Arbeitskräfte unter den Bedingungen starker Winde, gelegentlicher Staubstürme und intensiver Sonne arbeiten müssen. Es könnte künftig möglich sein, KI oder Roboter für solche massiven Projektentwicklung einzusetzen und damit den Ansatz von Arbeitskräften in Wüsten zu vermeiden. Die langfristigen Auswirkungen von Wind- und Photovoltaikanlagen großer Dimensionen auf die lokalen und globalen Windverhältnisse, die Niederschläge und das Klima werden noch nicht ausreichend verstanden.

Derzeit werden die Lieferketten wichtiger Metalle für Windkraftanlagen und Batterien stark von China kontrolliert, fast 87 % der Seltene Erde werden in China verarbeitet.²³⁰ Für eine groß angelegte Produktion von E-Fuels muss China eine stabile und zuverlässige Versorgung von Komponenten und wichtigen Metallen über einen langen Zeitraum sicherstellen. Dies erfordert eine noch nie dagewesene geopolitische Zusammenarbeit und wird uns in neue Abhängigkeiten stürzen.

²³⁰ Vgl. Visual Capitalist, 2022.