

Pathways to a Zero Carbon Transport Sector

DI Alessandra Angelini
Ing. Holger Heinfellner, BSc
Dr. Thomas Krutzler
Dr. Johanna Vogel
DI Ralf Winter



Projektleitung

Ing. Holger Heinfellner, BSc

AutorInnen

DI Alessandra Angelini

Ing. Holger Heinfellner, BSc

Dr. Thomas Krutzler

Dr. Johanna Vogel

DI Ralf Winter

Lektorat

Ira Mollay

Satz/Layout

Thomas Lössl

Diese Publikation wurde im Auftrag des Klima- und Energiefonds im Rahmen der 1. Ausschreibung „Zero Emission Mobility“ erstellt.

Weitere Informationen zu Umweltbundesamt-Publikationen unter: <http://www.umweltbundesamt.at/>

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG	5
ABSTRACT	7
1 HINTERGRUND	9
2 GRUNDLAGEN	11
2.1 Projekt-Zielsetzung	11
2.2 Projekt-Struktur und Zeitplan	11
2.3 Methodische Herangehensweise	12
3 DEKARBONISIERUNG UND DEFOSSILISIERUNG IM VERKEHRSSSEKTOR	14
4 ANALYSE ANTRIEBSFORMEN UND KRAFTSTOFFE	18
4.1 Alternative Antriebssysteme	18
4.1.1 Electric Road Systems	18
4.1.2 Batterieelektrischer Antrieb	20
4.1.3 Wasserstoff	23
4.1.4 Synthetischer Kraftstoff	24
4.2 Biogene Kraftstoffe	26
4.2.1 Rahmenbedingungen für den Einsatz biogener Kraftstoffe	26
4.2.2 Arten biogener Kraftstoffe	27
4.3 Konventionelle Kraftstoffe	30
4.4 Überblick an Antriebsformen und Kraftstoffen	30
4.5 Use-Cases: Mögliche Antriebsformen im Verkehrssektor	32
5 ENTWICKLUNGSPFAD UND MENGENGERÜST	35
5.1 Rahmenbedingungen und Annahmen	35
5.2 Entwicklungspfad und Mengengerüst Klimaneutralität 2050	37
5.2.1 Entwicklungspfad Endenergie Verkehr (inkl. Flug 2050)	37
5.2.1 Primärenergiebedarf (inkl. Flug 2050)	40
5.2.2 Entwicklungspfad Endenergie Verkehr (exkl. Flug 2050)	41
5.2.3 Primärenergiebedarf (exkl. Flug 2050)	41
5.3 Klimaneutralität 2040	43
5.4 Energie- und Treibhausgasmodellierung	44
5.4.1 Modell	44
5.4.2 Verkehrsleistung	45
5.4.3 Energieeinsatz	45
5.4.4 Kohlendioxid-Emissionen	47
5.5 Preis- und Kostenstruktur	47
6 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE ANALYSE	50
6.1 Auswirkungen auf österreichische Unternehmen	50

6.2	Auswirkungen auf österreichische Haushalte	53
6.3	Auswirkungen auf den österreichischen Staat	54
7	AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF	55
8	VERZEICHNIS.....	56
8.1	Abbildungsverzeichnis	56
8.2	Tabellenverzeichnis.....	57
8.3	Quellen und Literaturverzeichnis.....	57
9	ANHANG	61

ZUSAMMENFASSUNG

Vor dem Hintergrund des am 4. November 2016 in Kraft getretenen Pariser Klima-Übereinkommens wurde von der Österreichischen Bundesregierung im Juni 2018 die Österreichische Energie- und Klimastrategie #mission2030 beschlossen. Diese gibt das Ziel eines konsequenten Dekarbonisierungs-Pfades bzw. -Prozesses bis 2050 vor.

Die Studie „**Pathways to a Zero Carbon Transport Sector**“ knüpft hier an und dient dazu, mögliche Pfade zur Erreichung der Klimaziele 2030/2050 für eine CO₂-neutrale Personen- und Gütermobilität aufzuzeigen. In Szenarien wird ein Mix aus Technologie-Optionen im Verkehrssektor sowie dem Einsatz alternativer Kraftstoffe und erneuerbaren Stroms modelliert mit dem Ergebnis klar kommunizierbarer Energie- und Technologiepfade bis 2050.

Parallel dazu erfolgt eine sektorübergreifende Betrachtung bezüglich der nötigen Mengen an unterschiedlichen bereitzustellenden Energieformen sowie eine Abschätzung darüber, was dies für den Energiesektor bedeuten würde. Mittels Interviews mit ExpertInnen aus den Bereichen Fahrzeugindustrie, Energiebereitstellung, Forschung und Politik werden diese Entwicklungspfade auf ihre Machbarkeit hin geprüft und neue Erkenntnisse integriert.

Um die verkehrsinduzierten Treibhausgas-(THG)-Emissionen zu reduzieren und einen Schritt zur Erreichung der ambitionierten Klima- und Energieziele zu setzen, sind die Maximen der Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und Verkehrsverbesserung zu verfolgen. Dies betrifft den Umstieg auf erneuerbare Energien, den notwendigen Ausbau der Verkehrswegeinfrastruktur für den Modal-Shift von der Straße auf die Bahn sowie den Einsatz alternativer Antriebssysteme, wie beispielsweise Electric Road Systems, batterieelektrische bzw. wasserstoffbasierte Antriebe.

Im erarbeiteten Entwicklungspfad wird der straßengebundene Verkehr elektrisch erfolgen. Im motorisierten Individualverkehr (PKW und Zweiräder) wird überwiegend der batterieelektrische Antrieb zum Einsatz kommen, mit einem sehr geringen Anteil an Fahrzeugen mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie.

Ähnlich sieht die Zusammensetzung bei den leichten Nutzfahrzeugen aus. Insbesondere Sammel- und Verteilverkehre werden mit batterieelektrischen (BEV)-Fahrzeugen abgewickelt werden. Vor allem im gütergebundenen Langstreckenverkehr werden entsprechende Energiedichten benötigt, um die Volumina auf den verschiedenen Verkehrsträgern klimaneutral und wirtschaftlich rentabel zu transportieren.

Daher werden bei den schweren Nutzfahrzeugen die Antriebe auf Oberleitungssysteme, batterieelektrischen Antrieb und Wasserstoff-(H₂)-Brennstoffzelle aufgeteilt. Bei Bussen (Stadtbusse und Reisebusse) wird ein Technologiemix in Abhängigkeit des Einsatzzweckes angenommen.

Der Schienenverkehr erfolgt fast ausschließlich oberleitungselektrisch mit wenig H₂-Brennstoffzellenantrieb (z. B. bei Vershubtätigkeit). Bei der Binnenschifffahrt ist der synthetische Kraftstoff die dominierende Antriebsart. Der Flugverkehr basiert ausschließlich auf synthetischen Kraftstoffen.

Im Off-Road-Bereich werden die Fahrzeuge batterieelektrisch (z. B. Baufahrzeuge, Aggregate) und aus biogenen Kraftstoffen (z. B. Forst- und Landwirtschaft) angetrieben.

Aufgrund der limitierten Verfügbarkeit an Erneuerbaren ist künftig ein intelligenter und effizienter Umgang mit Energie vonnöten.

Aus dem zu Grunde liegenden Antriebsmix ergibt sich für das Jahr 2050 ein energetischer Endverbrauch von rund 130 PJ. Die zur Verfügung stehenden Primärenergien aus erneuerbaren Energien von rund 172 PJ ergeben sich aus dem Technologiemix. Notwendig hierfür sind Änderungen im Bereich der Organisation des Verkehrssystems, der Infrastruktur sowie der zugrunde liegenden Raumstruktur und des Verhaltens der VerkehrsteilnehmerInnen.

Mobilität auch zukünftig zu gewährleisten und zugleich die Umweltauswirkungen und Verkehrsbelastungen zu reduzieren ist die große Herausforderung der erforderlichen Mobilitätswende. Daher werden die makroökonomischen Auswirkungen und Wettbewerbseffekte der vorgestellten Energiepfade qualitativ bewertet. Zusätzlich ist es das Ziel, Innovation zu fördern und den Wirtschaftsstandort Österreich zu stärken.

ABSTRACT

Following the Paris Agreement on Climate Change, which entered into force on November 4 2016, the Austrian Federal Government adopted the Austrian Energy and Climate Strategy "mission2030" in June 2018. It sets the goal of a consistent decarbonisation pathway or process by 2050.

The study „**Pathways to a Zero Carbon Transport Sector**“ builds on this and serves to identify possible pathways to achieving the 2030/2050 climate goals for CO₂-neutral passenger and freight mobility. Within scenarios, a mix of technology options in the transport sector and the use of alternative fuels and renewable electricity are modelled resulting in clearly communicable energy and technology pathways up to 2050.

At the same time, there is a cross-sectoral analysis of the required amount of energy to be provided and an estimation what this means for the energy sector. By means of interviews with experts from the fields of vehicle industry, energy supply, R&D and politics these scenarios are examined for their feasibility and new insights are integrated.

In order to reduce the traffic-induced GHG emissions and to achieving the ambitious climate and energy goals, measures in traffic avoidance, traffic shifting, and traffic improvement are pursued. This concerns the switch to renewable energies, the necessary expansion of the transport infrastructure for the modal shift from road to rail and the use of alternative drive systems such as electric road systems, battery-electric or hydrogen-based drives.

In the developed pathways is road traffic electric. In motorized private transport (cars and two-wheelers) battery-electric drives will predominantly be used. A small percentage will be H₂ fuel cells.

The composition is similar for light commercial vehicles. In particular, groupage and distribution traffic are handled with BEV vehicles. Particularly in long-distance freight transport, appropriate energy densities are required to transport the volumes on the various modes of transport in a climate-neutral and economically viable manner.

For this reason, the drives in heavy commercial vehicles are divided into overhead contact line systems, battery-electric drives and H₂ fuel cells. For buses (city buses and coaches), a technology mix is created depending on the intended use.

The rail traffic is almost exclusively electric overhead lines with little H₂ fuel cell drive (e.g. when shunting). In inland navigation, synthetic fuel is the dominant type of propulsion. Air traffic is based exclusively on synthetic fuels.

In the off-road area, the vehicles are powered by battery-electric (e.g. construction vehicles, aggregates) and from biogenic fuels (e.g. forestry and agriculture).

Due to the limited availability of renewables, a more intelligent and efficient use of energy will be necessary in the future.

The underlying drive and technology mix results in a final energy consumption of approx. 130 PJ and available primary energy from renewable energies of approx. 172 PJ. Changes in the organization of the traffic system, the infrastructure as

well as the underlying spatial structure and the behavior of road users are necessary.

Ensuring mobility in the future as well as reducing environmental impact and traffic congestion is the major challenge of the required mobility shift. Therefore, the macroeconomic and competitive effects of the energy pathways are assessed qualitatively. In addition, the goal must be to promote innovation and strengthen Austria as a business location.

1 HINTERGRUND

Das übergeordnete Ziel der Europäischen Klimapolitik ist die Einhaltung des 2 °C-Ziels. Dieses steht im Einklang mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen des Weltklimarates (IPCC) und wurde mit dem Pariser Klimaabkommen vom Dezember 2015 bekräftigt. Für Industrieländer bedeutet dies einen weitgehenden Verzicht auf den Einsatz fossiler Energieträger bis Mitte des Jahrhunderts. Österreich hat das Pariser Klimaabkommen unterzeichnet und bekennt sich damit zum Ziel einer weitgehenden Dekarbonisierung, auch des Verkehrssektors, bis zum Jahr 2050.

Darüber hinaus wurden auf nationaler Ebene Klimaziele definiert: So ist in der integrierten Klima- und Energiestrategie der österreichischen Bundesregierung #mission2030 festgeschrieben, dass die Emissionen aus dem Verkehr bis 2030 um 36 % gegenüber dem Jahr 2005 reduziert werden sollen. Im Regierungsprogramm 2020–2024 wird bereits für das Jahr 2040 Klimaneutralität angestrebt.

Diesen Zielsetzungen stehen die aktuellen Entwicklungen im Verkehrssektor gegenüber, denen zufolge die Treibhausgasemissionen aus dem Verkehr im Jahr 2018 bereits auf 23,8 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente angestiegen sind und das Sektorziel gemäß Klimaschutzgesetz im Verkehr nicht erreicht wurde. Für das Jahr 2019 wird nach ersten Abschätzungen bereits zum fünften Mal in Folge ein weiterer Anstieg der verkehrsbedingten Treibhausgas-Emissionen im Ausmaß von voraussichtlich 1,2 % im Vergleich zum Vorjahr erwartet.

Internationale Klimaziele

Nationale Klimaziele

Anstieg der nationalen THG-Emissionen

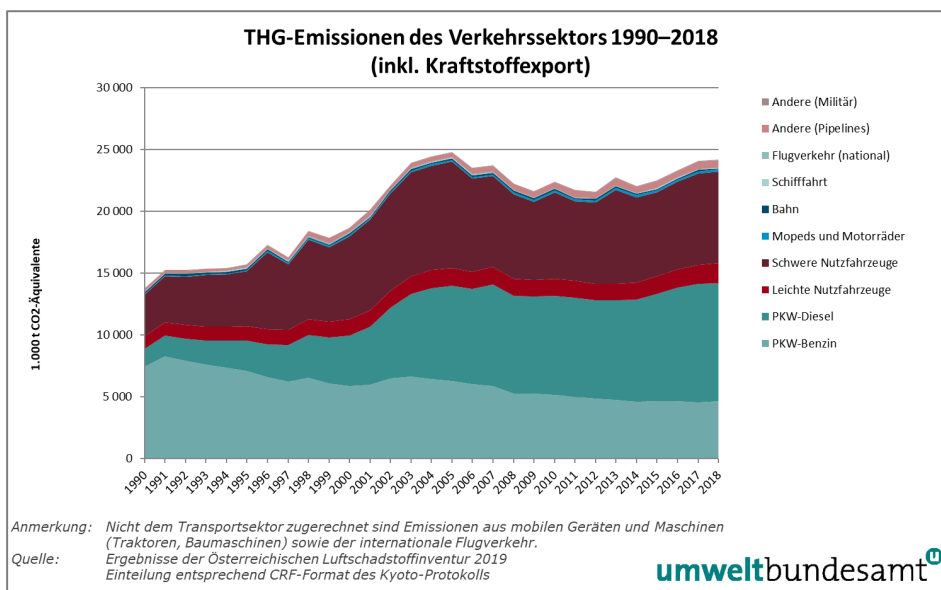
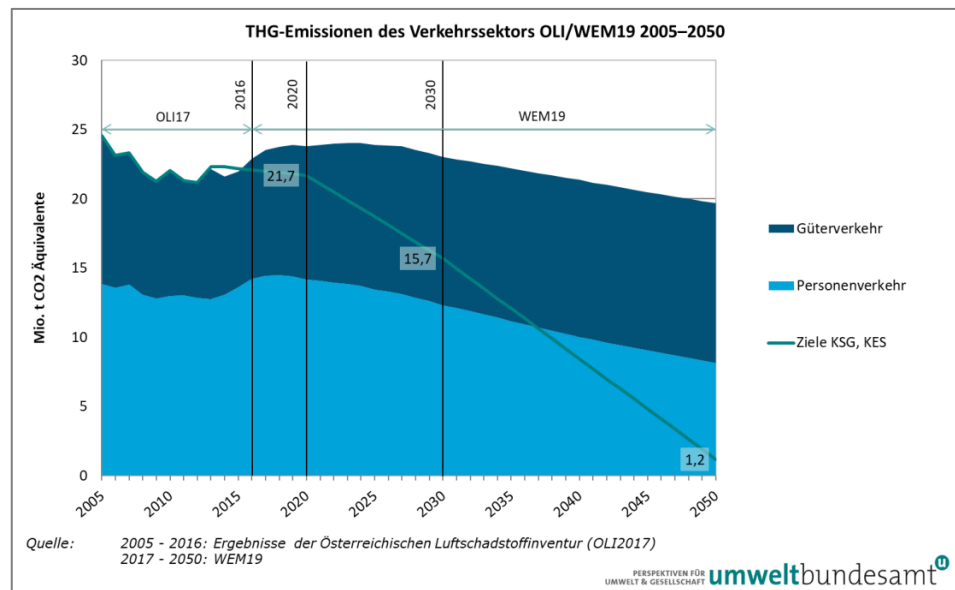


Abbildung 1:
THG-Emissionen des
Verkehrssektors
1990–2018
(Quelle:
Umweltbundesamt)

Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, wurden auf nationaler Ebene verschiedene Strategiepapiere erstellt, die den Rahmen für die notwendige Mobilitätswende bilden und bei der Umsetzung mobilitätsrelevanter Maßnahmen unterstützen sollen. Dazu zählen die Klima- und Energiestrategie und das Regierungsprogramm 2020–2024 ebenso wie der nationale Energie- und Klimaplan, der im Dezember 2019 an die Europäische Kommission übermittelt wurde.

Im Szenario WEM (With-Existing-Measures) aus dem Jahr 2019 ist die Entwicklung der THG-Emissionen im Personen- und Güterverkehr mit derzeit bestehenden Maßnahmen berechnet und abgebildet worden (siehe Abbildung 2). Gegenübergestellt sind die Zielsetzungen des Klimaschutzgesetzes (KSG) (21,7 Millionen Tonnen im Jahr 2020), der Klima- und Energiestrategie (KES) (15,7 Millionen Tonnen im Jahr 2030) und das Pariser Klimaziel (1,2 Millionen Tonnen im Jahr 2050). Die Ergebnisse des WEM-Szenarios zeigen zwar eine Reduktion der THG-Emissionen von rund 20 % im Jahr 2050 gegenüber 2005, die Zielsetzungen der THG-Emissionen können hingegen ab 2020 nicht mehr erreicht werden.

Abbildung 2:
Entwicklung der THG-Emissionen mit bestehenden Maßnahmen
(Quelle: Umweltbundesamt)



2 GRUNDLAGEN

2.1 Projekt-Zielsetzung

Das Projekt hat sich zum Ziel gesetzt einen Entwicklungspfad für den Verkehrssektor zur Erreichung der Klimaziele 2050 zu erarbeiten. Klimaneutralität soll 2050 erreicht werden. Dabei wird eine sektorübergreifende Analyse der benötigten Energiemengen sowie die Evaluierung der makroökonomischen und wirtschaftlichen Effekte vorgenommen.

Klimaneutralität 2050

Für den Verkehrssektor wird ein optimaler Mix zugunsten alternativer Antriebssysteme und Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien (Elektrizität, Wasserstoff und Einsatz biogener sowie synthetischer Kraftstoffe) erarbeitet. Limitierender Faktor hierfür ist das Mengengerüst an verfügbaren erneuerbaren Energiemengen (Wind-, Wasser- und Sonnenenergie sowie Biomasse).

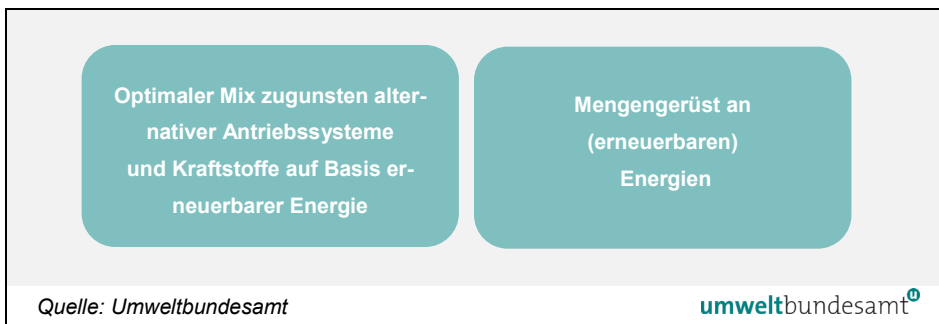


Abbildung 3: Projektzielsetzung

2.2 Projekt-Struktur und Zeitplan

Die seitens des Klima- und Energiefonds finanzierte Dienstleistungsstudie „Pathways to a Zero Carbon Transport Sector“ wurde im Zeitraum Juli 2019 bis November 2020 erstellt.

	2019						2020											
	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	
WP1 Projektmanagement	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP2 Development of technology & energy pathways	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP3 Expert interviews				■	■	■												
WP4 Cross-sectoral analysis	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP5 Energy and GHG emission modelling							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
WP6 Macro-economic analysis							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

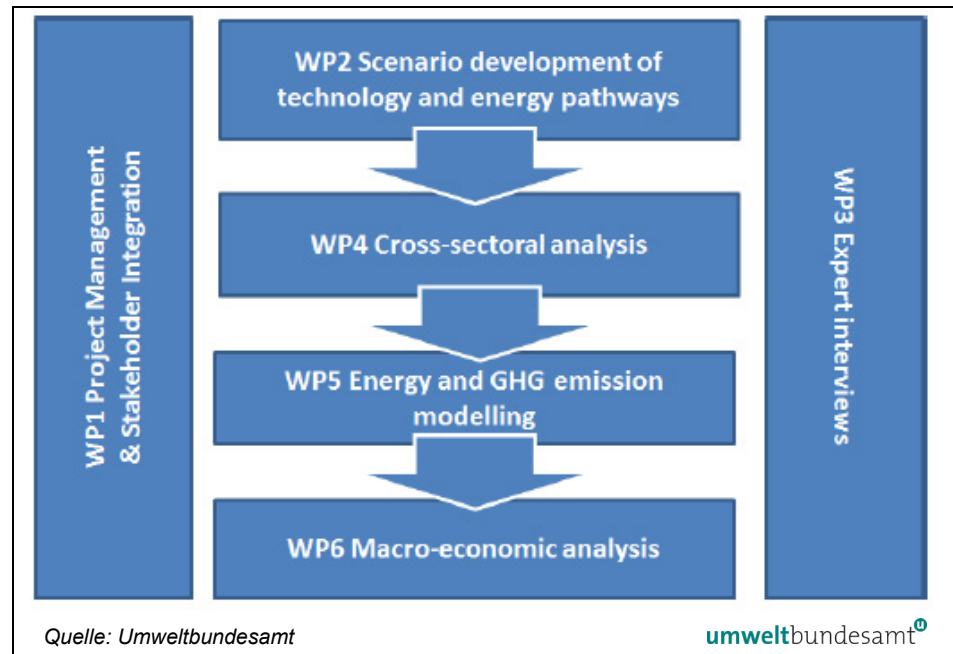
Quelle: Umweltbundesamt umweltbundesamt

Abbildung 4: Projektlaufzeit

Drei Bearbeitungsschwerpunkte

Die Studie kann in folgende drei Bearbeitungsschwerpunkte gegliedert werden: Anhand von Primär- und Sekundärdatenerhebungen werden mögliche Entwicklungspfade und erforderliche Energiemengen erarbeitet. Diese werden einer sektorübergreifenden Analyse sowie einer Emissionsmodellierung im Hinblick auf die Zielerreichung der Klimaneutralität 2050 unterzogen. In einem letzten Schritt erfolgt die makroökonomische Evaluierung der erarbeiteten Entwicklungspfade.

Abbildung 5: Projektstruktur



2.3 Methodische Herangehensweise

Charakterisierung unterschiedlicher Antriebsarten

Basierend auf einer umfassenden Literatur- und Quellenrecherche werden unterschiedliche alternative Antriebsformen und Technologieoptionen recherchiert. Es erfolgt die Identifizierung und Charakterisierung CO₂-freier und CO₂-neutraler Antriebsarten, wobei Vor- und Nachteile, der aktuelle Technologiereifegrad sowie mögliche Herausforderungen für die Implementierung aufbereitet werden. Ergänzt wird der Wissensstand durch Interviews mit ExpertInnen aus der Branche. Der Fokus liegt auf der Einbeziehung unterschiedlicher Interessenslagen, um den aktuellen State-of-the-Art entsprechend abzubilden und fundierte Aussagen zum künftigen Einsatz alternativer Antriebsformen zu tätigen.

Das Klima- und Energieszenario Transition aus dem Jahr 2017 bildet die Grundlage für die Arbeiten am Projekt Pathways to a Zero Carbon Transport Sector. Dabei handelt es sich um ein energiewirtschaftliches Szenario des Umweltbundesamtes im Hinblick auf die Klimaziele 2030 und 2050 mit folgenden prioritären Eckpunkten:

- Reduzierung der THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 81 % gegenüber 1990
- Nutzung erneuerbarer Energieträger
- Entwicklung neuer Technologien (z. B. Antriebstechnologie)
- Fortschritte bei der Energieeffizienz
- Reduktion von Verkehrsleistung und Motorisierungsgrad
- Überlegungen zur demographischen Entwicklung und Wirtschaftsleistung

Die Daten des Transition 2017 inklusive der zugrunde liegenden Storyline werden nach dem energetischen Endverbrauch in TJ je Fahrzeugkategorie für die Jahre 2020, 2030 und 2050 aufbereitet. Der energetische Endverbrauch wird auf Grundlage diverser Inputs (aus Literaturrecherche und ExpertInnen-Einschätzung) adaptiert. Daraus ergibt sich ein Energie-Mengengerüst (energetischer Endverbrauch und Primärenergie). Der dabei erarbeitete Entwicklungspfad wird im Zuge eines Stakeholder-Workshops validiert und final aufbereitet.

Klima- und Energieszenario Transition 2017

Entwicklungspfad

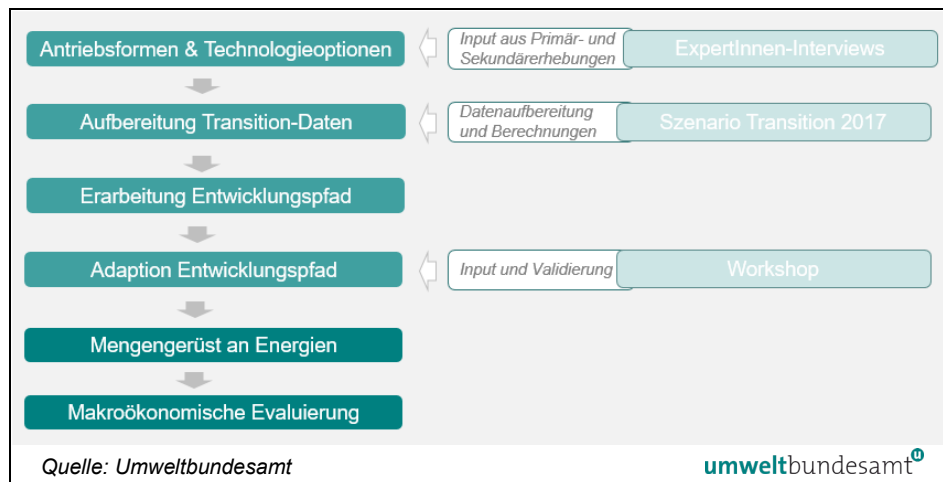


Abbildung 6: Methodische Herangehensweise

3 DEKARBONISIERUNG UND DEFOSSILISIERUNG IM VERKEHRSSSEKTOR

Für die Erreichung der Energie- und Klimaziele wird im Verkehrssektor Klimaneutralität angestrebt.

Emissionsfreie Elektromotoren

Klimaneutralität im Verkehr bedeutet, dass durch die physische Bewegung von Personen und Gütern die Menge an klimaschädlichen Gasen in der Atmosphäre nicht erhöht wird. Neben emissionsfreien Elektromotoren kann dies auch durch Verbrennungsmotoren gewährleistet werden, wenn das durch die Verbrennung freigesetzte Kohlendioxid zuvor in der gleichen Menge direkt oder indirekt (via Biomasse) der Atmosphäre entnommen wurde.

CO₂-neutrale Antriebsformen

Hier soll der Ausstieg aus fossilen Energieträgern erfolgen und nur CO₂-freie sowie CO₂-neutrale Antriebsmöglichkeiten zum Einsatz kommen (Defossilisierung).

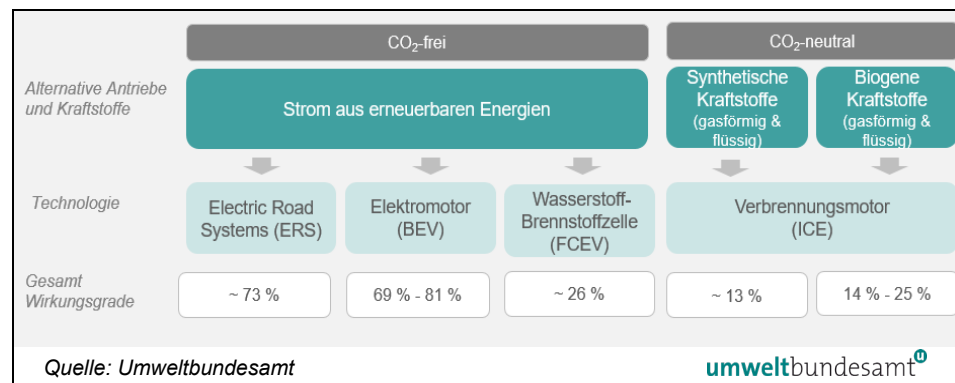
Eine vollständige Dekarbonisierung, d. h. ein Ausstieg aus dem Kohlenstoff würde demnach bedeuten, dass keine CO₂-neutralen Kraftstoffe wie zum Beispiel synthetische und biogene Kraftstoffe eingesetzt werden. Diese sind jedoch für die Erreichung der Energie- und Klimaziele vonnöten.

Eine Umstellung von Verkehren auf alternative Antriebssysteme sowohl im Personen- als auch Güterverkehr ist erforderlich. Dies betrifft landgebundene Verkehre (z. B. PKW, LNF, SNF), schienengebundene Verkehre wie auch Langstreckenverkehre mit den Verkehrsträgern Wasserstraße und Luft.

Energieeffizienz im Mittelpunkt

Vor dem Hintergrund, dass in Zukunft Energiemengen aus erneuerbaren Energien limitiert sein werden, spielt die Energieeffizienz sowohl bei der Energiebereitstellung als auch im Fahrbetrieb eine zentrale Rolle. So gilt es beim Einsatz alternativer Antriebsformen die gesamten Wirkungsgrade zu berücksichtigen, d. h. für die Energiebereitstellung (Well-to-Tank) und den spezifischen Energieverbrauch (Tank-to-Wheel). Bei der Gesamteffizienzbetrachtung ist die Wandlung von Primärquellen einzubeziehen, denn sonst werden durch die Systemabgrenzung bewusst nur Teile des Systems herausgegriffen.

Abbildung 7:
Alternative Antriebsformen aus erneuerbaren Energien



Das Team der Agora Verkehrswende hat im März 2017 zwölf Thesen für die Energie- und Verkehrswende erarbeitet. Für den technologischen Bereich im Verkehrssektor sind die beiden Thesen „These 06 Elektromobilität ist der Schlüssel der Energiewende im Verkehr“ und „These 07 Klimaneutrale Kraftstoffe ergänzen Strom aus Wind und Sonne“ von besonderer Bedeutung.

Der batterieelektrische Antrieb ist im landgebundenen Verkehr ein Garant für Energieeffizienz. Im Straßenverkehr zählen folgende Fahrzeuge zur Elektromobilität:

- Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles – BEV),
- Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung (Range Extended Electric Vehicles – REEV),
- Plug-in-Hybridfahrzeuge (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEV),
- Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV).

Wie in Abbildung 8 dargestellt, ist der batterieelektrische Antrieb, gefolgt vom Brennstoffzellenfahrzeug, der vorteilhafteste, da der Strom ohne weitere Umwandlungs- und Transportverluste direkt genutzt werden kann (AGORA VERKEHRSWENDE 2017).

**Fahrzeuge
Elektromobilität**

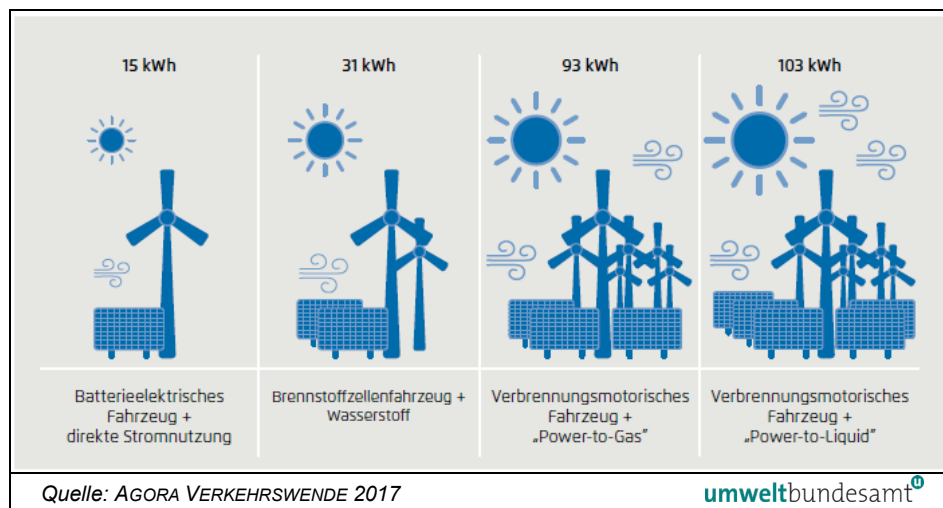
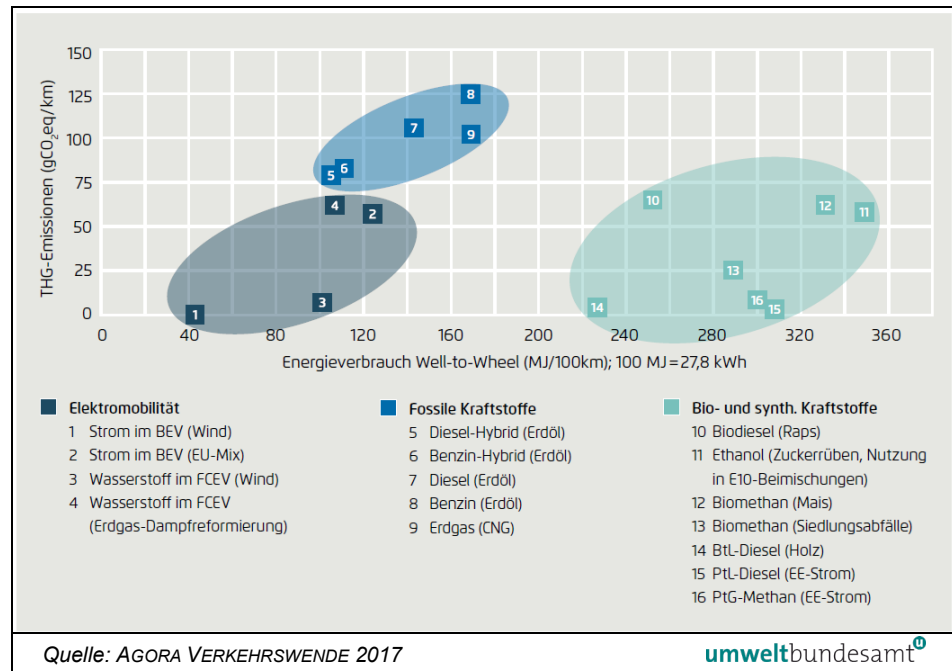


Abbildung 8: Strombedarf aus Erneuerbaren Energien für verschiedene Antriebs- und Kraftstoffkombinationen (pro 100 km).

Für die erforderliche Energie- und Verkehrswende wird aber nicht nur Strom aus regenerativen Energiequellen, sondern es werden auch flüssige oder gasförmige Kraftstoffe aus regenerativen Energiequellen sowie Kraftstoffe mit hoher THG-Minderung zum Einsatz kommen. Wie in Abbildung 9 ersichtlich, stellt Strom aus erneuerbaren Energien in BEV und FCEV die beste Option im Hinblick auf THG-Emissionen und Energieeffizienz dar. Der Einsatz von Erdgas hat leichte CO₂-Vorteile gegenüber fossilen Kraftstoffen und kann als Übergangs- bzw. Brückenkraftstoff zum Einsatz kommen. Dieser kann langfristig durch synthetisches Methan oder synthetische Kraftstoffe ersetzt werden. Die Kraftstoffgewinnung von synthetischem Kraftstoff hat den großen Nachteil, dass sie ineffizient ist. Es werden entsprechend hohe Energiemengen benötigt, um synthetischen Kraftstoff herzustellen, weswegen dieser als Ergänzung zu strombasierten Antrieben im Verkehrssektor eingesetzt wird (AGORA VERKEHRSWENDE 2017).

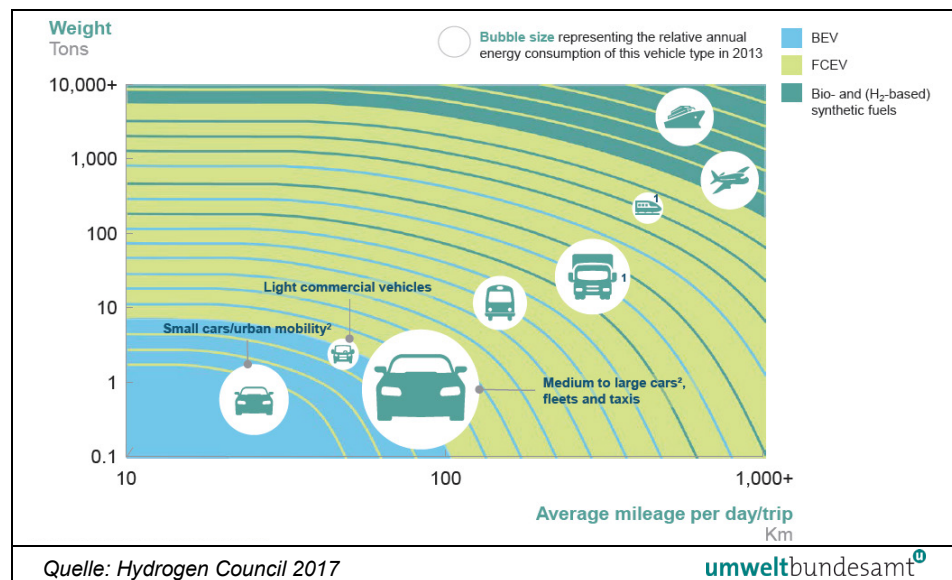
**flüssige oder
gasförmige
Kraftstoffe**

Abbildung 9:
THG-Emissionen
bezogen auf den
Energieverbrauch 2020
(Well-to-Wheel).



Mögliche Einsatzgebiete der alternativen Antriebsformen BEV und FCEV sowie biogener und synthetischer Kraftstoffe sind vom Hydrogen Council in nachstehender Graphik abgebildet worden. Entsprechend den auf Basis des Fahrzeuggewichtes notwendigen Energiedichten und Reichweiten sind die Anwendungsgebiete dargestellt und verortet worden. Insbesondere im landgebundenen Verkehr wird der Elektromobilität und FCEV eine große Relevanz beigemessen.

Abbildung 10:
Einsatz alternativer
Antriebsformen im
Verkehrssektor.



In der im November 2018 veröffentlichte Studie „How to decarbonise European transport by 2050“ werden Pfade zur Erreichung der Klimaziele 2050 erarbeitet. Dabei wird vorgesehen, dass im motorisierte Individualverkehr (MIV) der Anteil der Neuzulassungen emissionsfreier Fahrzeuge im Jahr 2035 100 % beträgt; um das Ziel zu erreichen müssen demnach im Jahr 2030 bereits mehr als 35 % neu

zugelassen werden. Berechnungen zufolge emittiert der noch verbleibende fossil betriebene Fahrzeugbestand bis 2050 rund 60 Millionen Tonnen CO₂.

Für die Steigerung an Neuzulassungen emissionsfreier Fahrzeuge müssen deren Anschaffungskosten gesenkt und die Anschaffungs- und Betriebskosten fossil betriebener Verbrennungskraftmaschinen erhöht werden. Außerdem sind sichere, wettbewerbsfähige und nachhaltige Batterie-Lösungen zu entwickeln.

In den nachfolgenden Abbildung 11 sind die Annahmen und Ergebnisse von Neuzulassungen und Fahrverboten dargestellt. Es zeigt sich ganz klar, dass durch die Umsetzung von Neuzulassungen die Emissionen reduziert werden können. Die Zielsetzung für 2050 lässt sich jedoch nur durch Fahrverbote für fossil betriebene Verbrennungskraftmaschinen erreichen (TRANSPORT & ENVIRONMENT 2018).

Steigerung der Neuzulassung emissionsfreier Fahrzeuge

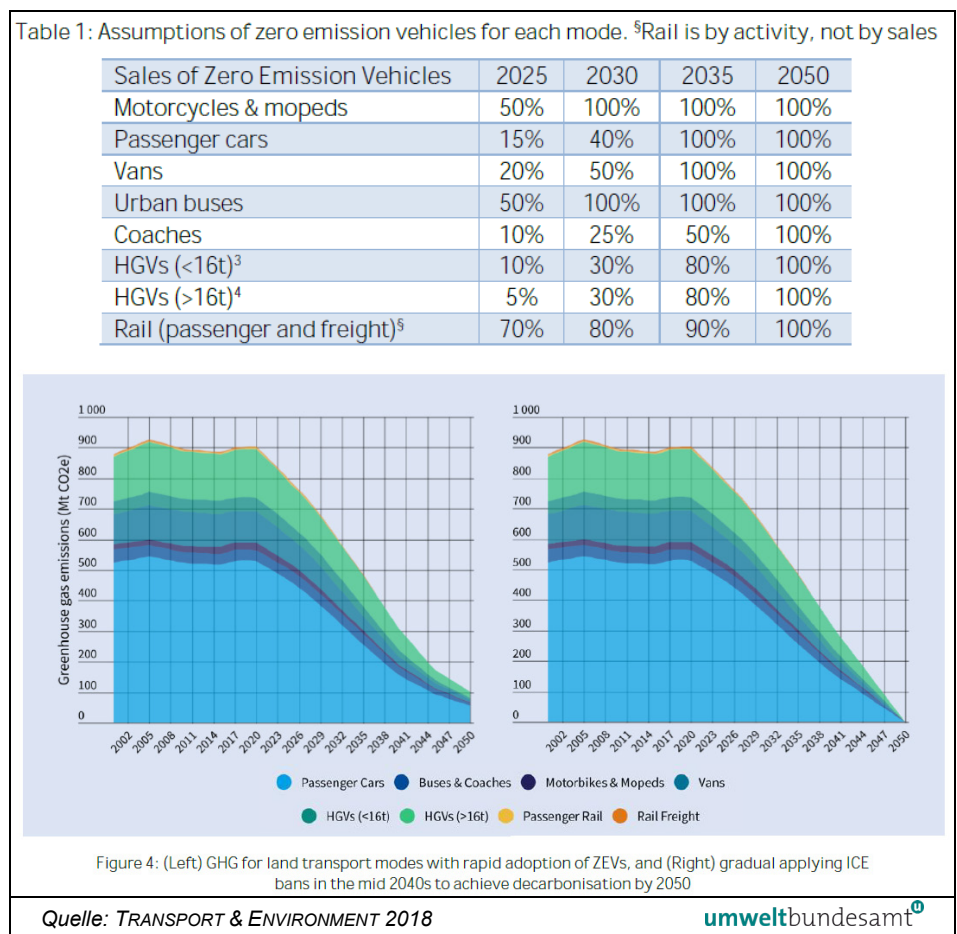


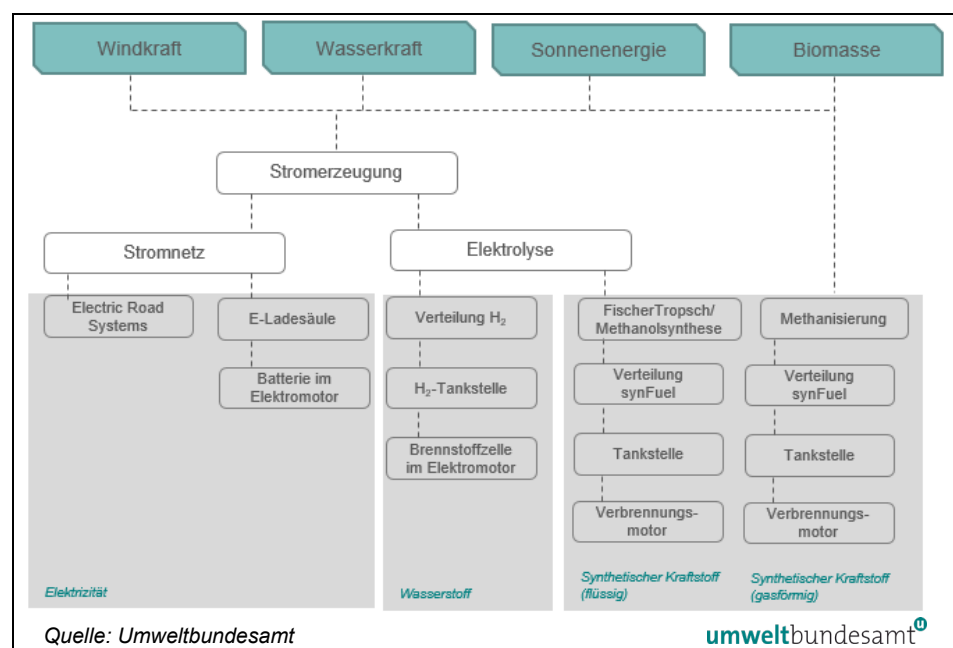
Abbildung 11: Annahmen Neuzulassungen bei Verkehrsmitteln und THG-Entwicklung.

4 ANALYSE ANTRIEBSFORMEN UND KRAFTSTOFFE

4.1 Alternative Antriebssysteme

Alternative Antriebssysteme umfassen strombasierte Antriebe (Electric Road Systems und Elektromobilität), genauso wie wasserstoffbasierte Antriebe und synthetische Kraftstoffe, die aus Strom oder direkt aus Biomasse gewonnen werden können. Die unterschiedlichen Antriebssysteme weisen verschiedene Vor- und Nachteile auf und haben Ausbau- bzw. Optimierungspotenziale, die im folgenden Kapitel näher beschrieben werden.

Abbildung 12:
Energieketten zur
Herstellung alternativer
Antriebsformen aus
erneuerbaren Energien



4.1.1 Electric Road Systems

Electric Road Systems umfassen die Elektrifizierung ausgewählter Verkehrswege, insbesondere des stark frequentierten Autobahn- und Schnellstraßennetzes mittels leitungsgebundener Infrastruktur.

Derzeit steht eine Vielzahl an Technologieoptionen zur Verfügung, die in unterschiedlichen (Demonstrations-)Projekten getestet werden. Folgende drei Lösungssysteme haben sich aufgrund der technischen Machbarkeit bisher herauskristallisiert (siehe Abbildung 13):

- Oberleitung
- Konduktives System über Stromschienen
- Induktives System

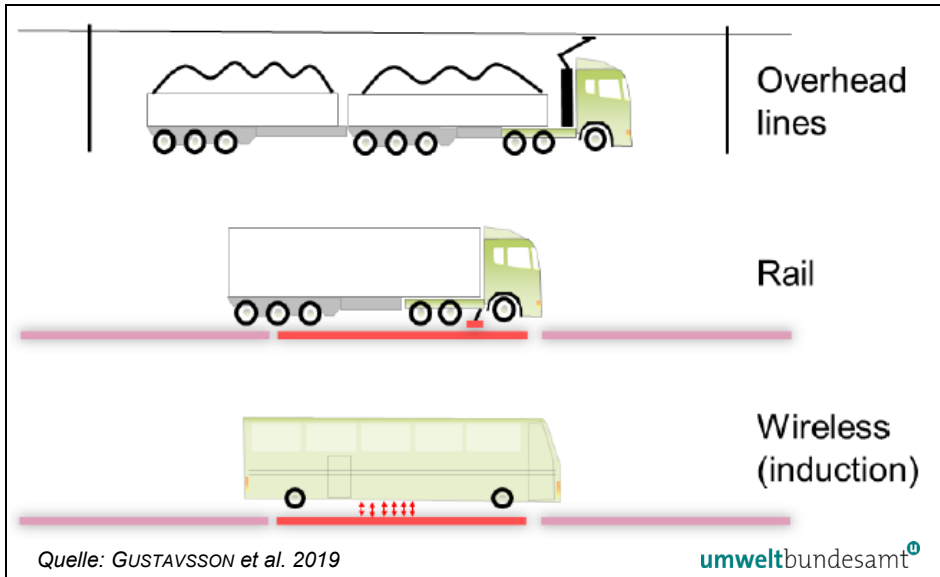


Abbildung 13:
Überblick Electric Road Systems.

Vor- und Nachteile

Electric Road Systems können als Antriebs- und Ladeinfrastruktur angesehen werden und zeichnen sich vor allem durch die hohe Energieeffizienz von Elektrofahrzeugen aus. Die Vor- und Nachteile der bestehenden Electric Road Systems sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Oberleitung	
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Effiziente Stromübertragung ● Bereits bestehende Technologie der Oberleitung ● Keine Beschädigung der Fahrbahnoberfläche
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Nutzung nur durch Busse und schwere Nutzfahrzeuge (Personen und leichte Nutzfahrzeuge können die Oberleitung nicht verwenden) ● Hohe Wartungshäufigkeit (Verschleiß aufgrund der Reibung) ● Visueller Reiz bzw. Trenneffekte in der Landschaft
Konduktives System über Stromschienen	
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Hohe Übertragungseffizienz ● Nutzung durch Personen- und Güterfahrzeuge ● Geringer visueller Reiz
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Sicherheitsrisiko für VerkehrsteilnehmerInnen durch elektrifizierte Schienen ● Ausfall- bzw. Störungsrisiko durch Schlamm oder Schnee ● Erfordert die Errichtung von Schienen in der Straßenoberfläche ● Hohe Wartungshäufigkeit (Verschleiß aufgrund der Reibung)

Tabelle 1:
Vor- und Nachteile
Electric Road Systems.

Induktives System	
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Nutzung durch Personen- und Güterfahrzeuge ● Geringer visueller Reiz ● Keine Reibung und kein Verschleiß der Infrastruktur aufgrund der drahtlosen Verbindung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Erfordert die Errichtung von Übertragungssystemen in der Straßenoberfläche ● Hohe Investitionskosten ● Potenziell hoher Wartungsaufwand, um Stromversorgung sicherzustellen

Entwicklungspotenzial und potenzielle Hemmnisse

**technische
Einschränkungen**

Bei Electric Road Systems kann es zu technischen Einschränkungen kommen. Die Erfahrungen aus den aktuellen Feldtests von ERS in Schweden und Deutschland haben gezeigt, dass die Installation von Oberleitungen (ausgereifteste Technologie) aufgrund der Topographie eine potenzielle Herausforderung darstellt. Die Elektrifizierung auf Straßen mit Hügeln, Vertiefungen, einspurigen, engen Kurven, Tunneln und Brücken ist weitaus schwieriger durchzuführen. (GUSTAVSSON et al. 2020)

Die Errichtung von ERS erfordert erhebliche Investitionskosten. Für die Elektrifizierung von 70% des deutschen Kernautobahnnetzes (4.300 km) mit Freileitungen werden rund 12 Mrd. EUR veranschlagt. In einer schwedischen Machbarkeitsstudie werden Investitionskosten für bestehende ERS-Technologien auf 1,88 Mio. EUR / km bzw. 7 Mio. EUR / km geschätzt (OLSSON 2014). „Der Kostenvorteil des Oberleitungssystems gegenüber dem konduktiven Ladungssystem über Stromschienen beträgt – je nach betrachteter Variante – rund 33 bis 80 %, die Kosten für die straßenseitige Infrastruktur des induktiven Ladungssystems liegen in allen Varianten um mehr als 100 % über den Kosten für die Oberleitungsinfrastruktur.“ (WIETSCHEL et al. 2017).

Finanzierung

Überlegungen zur Finanzierung sind für öffentliche und private Investoren von entscheidender Bedeutung und bestimmen die finanzielle Durchführbarkeit von ERS. Bisherige Bestrebungen zur Implementierung wurden durch die Öffentliche Hand vorangetrieben. Dies ist auch notwendig für eine erfolgreiche Etablierung des Systems, denn es müssen sowohl die Infrastruktur bereitgestellt als auch geeignete Fahrzeuge produziert werden.

4.1.2 Batterieelektrischer Antrieb

Bei lokal emissionsfreien batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) wird ein Elektromotor mit einem Akkumulator und der erforderlichen Steuerungselektronik kombiniert.

Vor- und Nachteile

**hohe
Energieeffizienz bei
Elektromotoren**

Ein großer Vorteil von batterieelektrischen Antrieben ist die hohe Energieeffizienz. Elektromotoren weisen Wirkungsgrade bis zu 85 % auf, wobei durch die technische Rückgewinnung von Energie, die beim Bremsen entsteht, der Akku-

mulator wieder aufgeladen werden kann (Rekuperation). In Abbildung 14 ist ersichtlich, dass die Effizienz von BEV bei der Umwandlung von eingesetzter Energie in Bewegungsenergie ungefähr um den Faktor 3 höher ist als bei benzin- und dieselbetriebenen PKW.

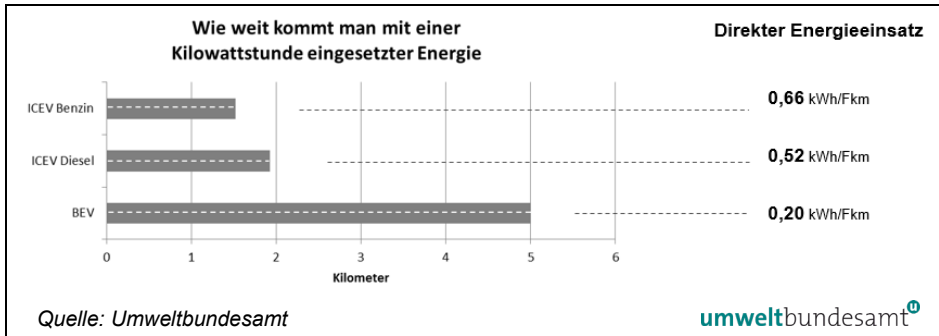


Abbildung 14:
Durchschnittliche Reichweite je Antriebskonzept mit einer Kilowattstunde direkt eingesetzter Energie

Bei der Betrachtung des Zusammenhanges zwischen Fahrzeuggewicht und Energieeinsatz ausgewählter BEV im MIV zeichnet sich nach der Studie von Heinfellner und Fritz (2019) folgendes Bild ab: Kleinst- und Kleinwägen mit dem geringsten Fahrzeuggewicht von 1000–1600 kg weisen die größte Energieeffizienz auf (max. 18 kWh/100 km). Kompaktwägen mit einem Fahrzeuggewicht zwischen 1600 und 1800 kg sind hingegen nicht notwendigerweise mit einem höheren Energieeinsatz gekennzeichnet. Der Stromverbrauch von 18 kWh je 100 km wird nur von drei der zwölf analysierten PKW überschritten. In der Ober- und Luxusklasse mit einem Fahrzeuggewicht von mehr als 2 Tonnen beträgt der Stromverbrauch mindestens 18 kWh/100 km.

Ein differenziertes Bild zeichnet sich beim Zusammenhang zwischen Reichweite und Energieeinsatz (lt. WLTP) ab. Bei der Luxus- und Oberklasse bedingen die größeren Kapazitäten der Fahrbatterie nicht automatisch höhere Reichweiten, da Fahrzeuge mehr Energie aufwenden müssen, um größere Massen zu bewegen. Fahrzeuge der Kompaktklasse erzielen bei geringerem Materialeinsatz und niedrigerem Stromverbrauch vergleichbare Reichweiten im Bereich von 400 km bis 500 km wie Fahrzeuge der Ober- und Luxusklasse mit höherem Stromverbrauch (HEINFELLNER & FRITZ 2019).

Die Herstellung der Batterien ist aufgrund der kurzen Inbetriebnahme der Akkufabriken derzeit aufwendig und teuer. Außerdem werden für die Herstellung der Akkumulatoren entsprechende Strommengen benötigt. Bis Ende 2020 werden 300 GWh an Akkukapazität produziert worden sein, davon 70 % in China. Betrachtet man die chinesische Stromzusammensetzung, so wird der Großteil des Stroms aus fossilen Energieträgern gewonnen, wodurch THG-Emissionen am Produktionsort anfallen.

Die Technologie der Li-Ionen-Batterie ist weitgehend ausgereift. Im Hinblick auf Reichweite, Lebensdauer und Schnellladefähigkeit ergeben sich unterschiedliche Use-Cases bzw. Anwendungsfälle (siehe Kapitel 4.5) (VOGEL et al. 2019). Die Lebensdauer von Li-Ionen Akkus variiert aufgrund des unterschiedlichen Ladeverhaltens (Stichwort Schnellladen) und der Qualität der Zelle sehr stark. Es kann nicht gewährleistet werden, dass ein Akkumulator für die Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren ausreicht. Zukünftige Entwicklungen werden die Lebensdauer von Akkus erhöhen (FRITZ et al. 2016).

Reichweite

Herstellung der Akkumulatoren

Lebensdauer

Derzeit kommen überwiegend Li-Ionen Akkus bei Elektro-PKW zum Einsatz. Eine Vielzahl an unterschiedlichen Ausführungen und Kombinationen an Materialien kommt in Frage: Lithium-Kobalt-Oxide, Lithium-Mangan-Oxide, Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide, Lithium-Eisen-Phosphate, Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide oder Lithium-Titan. Alle haben unterschiedliche Vor- und Nachteile in den Akku-relevanten Bereichen, wie zum Beispiel bei spezifischer Energiedichte, Kosten, Lebensdauer, Sicherheit, Anzahl an Ladezyklen oder Performance bei tiefen Temperaturen. Sicher ist, dass bis 2030 der Li-Ionen Akku in elektro-mobilen Anlagen dominieren wird. In diesem Zeitraum wird eine Verdoppelung der Energiedichte auf bis zu 300 Wh/kg bei gleichzeitiger Kostenreduktion auf unter 100 EUR/kg erwartet (derzeit rund 200 EUR/kg und 150 bis 160 Wh/kg) (FRAUNHOFER 2015).

Nach 2030 können andere Technologien wie Lithium-Schwefel, Lithium-Feststoff oder Metall-Luft-Akkus in den Markt treten. Hier herrscht jedoch noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf bis zur Marktreife; die Konkurrenzfähigkeit wird sich erst zeigen.

Entwicklungspotenzial und potenzielle Hemmnisse

- Netz Ladestationen** Einen Hebel zum Ausbau der Elektromobilität stellen die infrastrukturellen Lademöglichkeiten sowohl im öffentlichen als auch im privaten Raum dar. Für die Marktdurchdringung batterieelektrischer Fahrzeuge wird ein flächendeckendes Netz an Ladestationen im öffentlichen Raum als Erfolgsfaktor benötigt. Dies inkludiert auch die Implementierung von Schnellladestationen. Sichergestellt werden muss hierbei die Verfügbarkeit erforderlicher Energiemengen und die Kapazitäten, um Fahrzeuge nacheinander aufladen zu können.
- rechtliche Ebene** Auf der rechtlichen Ebene bedarf es insbesondere bei privaten Ladestationen einer Anpassung im Miet- und Wohnrecht, um Lademöglichkeiten als genehmigungsfreie Anlagen zu definieren. Derzeit muss bei der Installation der Basisinfrastruktur einer Ladestation ein Genehmigungsprozess in Bestandwohnbauten durchlaufen werden, bei dem alle MiteigentümerInnen zustimmen müssen.
- internationale Anpassungen** Um das grenzüberschreitende Laden sicherzustellen, muss eine Anpassung im Umsatzsteuergesetz auf EU-Ebene erfolgen, sodass die umsatzsteuerliche Registrierung – ähnlich wie in der Telekommunikationsbranche – im Fremdland entfällt.
- steuerliche Anreize** Eine weitere Stellschraube für die Erhöhung der Neuzulassungen sind steuerliche Anreize. Dies betrifft die Verlängerung der Sachbezugsbefreiung bei der batterieelektrischen Firmenflotte und den Wegfall der Umsatzsteuer beim PKW-Kauf.
- Förderungen** Eine Förderung energieeffizienter und emissionsfreier Fahrzeuge ist sowohl im MIV als auch im Güterverkehr (LNF und SNF) zielführend (BEÖ 2019).
- Recycling von Rohstoffen** Ein sparsamer Umgang mit den in den Akkumulatoren eingesetzten Rohstoffen ist anzustreben. Derzeit werden die Materialien Kupfer, Aluminium, Nickel, Kobalt, Eisen und Stahl recycelt – es gibt aber noch Optimierungsbedarf. Das Recycling des Lithiums eines Akkumulators (in einem Akku eines batterieelektrischen Fahrzeuges sind ca. 1–2 % Lithium enthalten) ist zwar technisch möglich, wird aber aktuell aufgrund wirtschaftlicher Faktoren nicht durchgeführt. Da die Rückgewinnung von Lithium sehr komplex und aufwendig ist, kann derzeit der

Sekundärrohstoffpreis nicht mit dem Primärrohstoffpreis mithalten. Ein künftiger Meilenstein im Recycling-Bereich könnte die Kennzeichnungspflicht der Akkumulatoren darstellen. So könnten zum Beispiel durch die Unterscheidung von nickelreichen oder kobaltreichen Batterien im Recyclingvorgang bessere und höhere Qualitäten erzielt werden.

4.1.3 Wasserstoff

Wasserstoff setzt sich aus den Elementen Wasser und Kohlenwasserstoff zusammen und weist eine hohe Energiedichte auf. In der Natur kommt Wasserstoff in gebundener Form vor, er kann aber auch aus Rohstoffen erzeugt werden. Grüner Wasserstoff, d. h. Wasserstoff aus erneuerbaren Energien, stellt eine vielversprechende Antriebsart für den Verkehrssektor dar. Mittels erneuerbaren Stroms wird Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten (Elektrolyse). Wasserstoff kann aber auch über die Vergasung von Biomasse hergestellt werden (VCÖ 2020).

Vor- und Nachteile

Ein Vorteil der Wasserstoff-Antriebstechnologie ist die Reichweite der Fahrzeuge. So realisiert beispielsweise der Hyundai NEXO eine Reichweite von 660 km nach WLTP (und 800 km nach NEFZ). Selbst bei hohen Reichweiten ist die Gewichtszunahme des Fahrzeugs im Vergleich zu fossil betriebenen Verbrennungsmotoren gering.

Weiters ist die kurze Betankungsdauer, die in der Regel unter drei Minuten liegt, sehr günstig. Aufgrund dessen lässt sich ableiten, dass die Wasserstoff-Brennstoffzelle bei Fahrzeugen mit hohen Reichweiten, Laufleistungen und Zuladungen sowie Fahrleistungen geeignet scheint. Ein Wasserstofftank fasst fünf bis sechs kg Wasserstoff.

Die leistungsstarke Brennstoffzelle ist zudem gut recycelbar, denn bis auf Platin werden keine seltenen Materialien benötigt. Das Recyceln von Platin ist einfach und technologisch gut ausgereift.

Die Wasserstofftechnologie ermöglicht es, durch die dynamische Kopplung an Kraftwerke mit erneuerbaren Energien Überschüsse zu nutzen, Energie von den Sommermonaten in die Wintermonate zu transferieren, um saisonale Schwankungen auszugleichen bzw. abzufedern und Energie zu speichern.

Zu den Nachteilen zählt unter anderem der geringe Wirkungsgrad. Für die Produktion von Wasserstoff sind hohe Energiemengen notwendig. Wasserstoff ist wie Strom ein Sekundärenergieträger, d. h. er muss aus anderen Quellen erzeugt werden und im Sinne der Dekarbonisierung aus erneuerbaren Quellen. Auf der großindustriellen Ebene wird derzeit die Elektrolyse eingesetzt. Erneuerbarer Strom wird genutzt, um Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Dies erreicht man bei Wirkungsgraden bis zu 70 %, d. h. 30 % der aufgewendeten Energie gehen verloren. Der Wirkungsgrad ist im Vergleich zur reinen Nutzung von direktem Strom, wie beispielsweise in Form eines batterieelektrischen Fahrzeuges, geringer. Doch es besteht auch hier die Möglichkeit von Verbesserungen, insbesondere bei der Photoelektrolyse, bei der Wasser mit Sonnenenergie direkt in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird.

Reichweite

**kurze
Betankungsdauer**

**schonender Einsatz
von Rohstoffen**

**geringer
Wirkungsgrad**

„Ein weiterer Nachteil der Technologie könnte aber auch gleichzeitig ein potenzieller Vorteil sein. Die Wasserstoff-Brennstoffzelle ist im Betrieb des Fahrzeuges weniger effizient als ein batterieelektrisches Fahrzeug, aber deutlich effizienter als eine Verbrennungskraftmaschine mit fossilen Kraftstoffen“, so Dr. Alexander Trattner, HyCentA Research GmbH. Der theoretische Wirkungsgrad der Niedertemperatur-Brennstoffzelle liegt im Fahrbetrieb bei 83 %, der der Hochtemperatur-Brennstoffzelle bei 96,5 %. Ausgeführte Systeme schaffen im PKW Peak-Wirkungsgrade im Bereich von 60 %, angestrebt werden Wirkungsgrade von über 75 % im Fahrbetrieb.

Entwicklungspotenzial und potenzielle Hemmnisse

Die hohen Kosten für die Herstellung sind darauf zurückzuführen, dass die industrielle Produktion der Wasserstoff-Brennstoffzelle deutlich weniger vorangeschritten ist als die Akkuproduktion für batterieelektrische Fahrzeuge.

Technologie noch teuer

Daher sind Fahrzeuge mit der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie teuer und könnten erst aufgrund von Skalen-Effekten kostengünstiger produziert werden. Für eine Marktdurchdringung der Technologie bedarf es daher eines Large-Scale-Ausbaus, um die Kosten zu verringern.

Verbesserungspotenzial bei Wirkungsgraden

Es bestehen Optimierungs- und Verbesserungsmöglichkeiten bei den Wirkungsgraden (z. B. Elektrolysen oder im Fahrbetrieb), jedoch bedarf es vor allem bei der Speicherung, insbesondere bei der großtechnischen (und dezentralen) Speicherung (z. B. in unterirdischen Gaslagern) weiterer Forschungs- und Entwicklungstätigkeit. Unterschiedliche Technologien existieren bereits, diese müssen jedoch jedenfalls weiterentwickelt werden und bisher hat sich keine dieser Technologien durchgesetzt.

Auf der infrastrukturellen Ebene ist das Angebot mit österreichweit derzeit fünf Wasserstoff-Tankstellen sehr spärlich. Wird der Weg der Wasserstofftechnologie im straßengebundenen Verkehr eingeschlagen, bedarf es einer entsprechenden Ausstattung an Tankstellen.

eigenes Netz für Transport

Betreffend den Transport kann man gasförmigen Wasserstoff ins bestehende Gasnetz einspeisen. Flüssiger Wasserstoff bräuchte für den Transport hingegen ein eigenes Netz. Wasserstoff zu verflüssigen bedeutet aber auch einen massiven Energieaufwand, der aus erneuerbaren Energien bezogen werden müsste.

Die Einsatzgebiete der Wasserstofftechnologie sind vielfältig und gleichzeitig sind die erforderlichen Energiemengen zur Herstellung begrenzt.

4.1.4 Synthetischer Kraftstoff

Rohstoffe der synthetischen Kraftstoffe können konventionelle Energiequellen wie Kohle und Erdgas, aber auch erneuerbare Energieträger wie Biomasse und Strom aus erneuerbaren Energieträgern sein.

Die Energieträger werden thermisch in Synthesegas konvertiert (dieses besteht aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff) und mittels der Fischer-Tropsch-Katalysatoren zu Kohlenwasserstoffen abgebaut. Biomass to X (BtX) verfolgt den Ansatz Kraftstoffe gänzlich aus Biomasse herzustellen (REIF et al. 2010).

Das Verfahren Power-to-X steht für Power-to-Liquid und Power-to-Gas für die Herstellung von E-Fuels. Diese sind aus regenerativen Energieträgern (Wind-, Wasser- und Solarenergie) hergestellt und können wie BtX in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. (VERBUND 2014).

Power-to-X

- PtG (Power-to-Gas): Mittels Elektrolyse wird der Strom in Wasserstoff umgewandelt. Dieser kann direkt ins Energiesystem eingespeist werden oder durch die Reaktion mit Kohlendioxid in Methan umgewandelt und dadurch gespeichert werden. Dies eröffnet die Möglichkeiten, energiebereitstellungsbedingte Schwankungen (z. B. Differenzen der Stromgewinnung mittels Solarenergie in den Winter- und Sommermonaten) auszugleichen.
- PtL (Power-to-Liquid): Das Kohlenwasserstoffgas wird mittels der Fischer-Tropsch-Synthese verflüssigt. (z. B. E-Diesel)

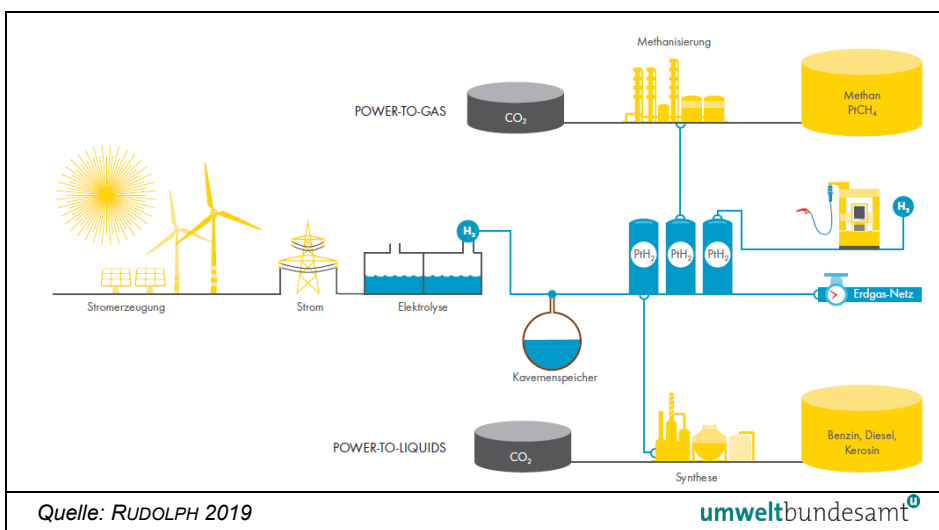


Abbildung 15:
Power-to-X
Herstellungspfade.

Vor- und Nachteile

Synthetische Kraftstoffe stellen eine (weitere) Option für einen CO₂-neutralen Verkehrssektor dar. Herr Gerhard Krachler von Magna Steyr meinte zu synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien: „Da synthetische Treibstoffe Folgeprodukte aus Wasserstoff sind, sehen wir aufgrund der längeren und schlechteren Wirkungsgradkette den Einsatz prioritär im Flugverkehr sowie auf der Wasserstraße und bei diversen Sonderanwendungen. Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe haben das Potenzial den Transportsektor ganzheitlich zu defossilisieren.“

Synthetische Kraftstoffe weisen im Vergleich zu alternativen Antriebsformen wie batterieelektrischer Antrieb oder wasserstoffbasierte Antriebe eine geringere Effizienz bzw. einen schlechteren Wirkungsgrad auf. Durch die Umwandlung von Strom und Biomasse in synthetische Kraftstoffe entstehen erhebliche Energieverluste (RUDOLPH 2019).

schlechterer Wirkungsgrad

„Entsprechend der Energiewertigkeit kann eine Rangordnung hinsichtlich des Einsatzes erfolgen – eine geringere Effizienz sollte nur dann in Kauf genommen werden, wo hohe Energiedichten mit flüssigen Kraftstoffen absolut notwendig sind. Dies zeichnet sich in der Luftfahrt und in der Hochsee-Schifffahrt ab“, so Dr. Alexander Trattner, HyCentA Research GmbH.

Entwicklungspotenzial und potenzielle Hemmnisse

Bioenergie und Wasserstoff aus erneuerbaren Energieträgern stellen die Basis von synthetischen Kraftstoffen dar. Durch die Wandlung von Wasserstoff und Kohlenstoffträger (CO, CO₂) werden mittels Methanisierung oder Fischer-Tropsch-Synthese synthetische Kraftstoffe bzw. E-Fuels hergestellt. Alternativ kann verfügbare Biomasse über ein Synthesegas in synthetischen Biokraftstoff überführt werden. *„Bei den synthetischen Biokraftstoffen ist der Entwicklungsstand noch nicht ganz ausgereift. Derzeit sind Pilotanlagen in Betrieb. Für die großtechnische und industrielle Produktion bedarf es weiterer Entwicklungsschritte“*, so Dr. Hofbauer der TU Wien.

intensivere Forschung

Die Industrialisierung solcher Anlagen dauert noch einige Jahre, weswegen die Forschungsaktivität im Bereich Wasserstofftechnologie und synthetischer Kraftstoff intensiviert werden muss. Dabei soll ein starker Fokus auf die Effizienzverbesserung, d. h. hoher Wirkungsgrad entlang der Well-to-Tank Betrachtung, gelegt werden.

4.2 Biogene Kraftstoffe

4.2.1 Rahmenbedingungen für den Einsatz biogener Kraftstoffe

Als rechtlicher Rahmen für den Einsatz biogener Kraftstoffe sind folgende europäische und nationale Dokumente heranzuziehen:

- Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energieträger (RED), (28/2009/EG).
 - 10 % Erneuerbare im VS, biogene Energieträger müssen „nachhaltig“ sein.
 - Nachhaltig: THG Höchstgrenzen (LCA); Anbaukriterien; direkte Rückverfolgbarkeit mittels „Massenbilanz“.
- Treibstoffqualitätsrichtlinie (FQD), (30/2009/EG)
 - Anbieter von Kraftstoffen sollen THG-Emissionen um 10 % (6 % verpflichtend) reduzieren (im Vgl. zu 2010; ab dem Jahr 2020).
 - Eingesetzte Biokraftstoffe müssen analog zu RED „nachhaltig“ sein.
- Nationale Umsetzung durch Kraftstoffverordnung 2012 (KVO)
 - 6,3 % Dieselmotoren, 3,4 % Benzinmotoren zu substituieren + THG-Minderung 6 % ab 2020.
 - Datenbank e1Na zur praktischen Abwicklung und für Reporting; Kontrollinstanz UBA.
- Erweiterungen der RED & FQD (umgesetzt mit KVO 2018)
 - Zusätzliches Ziel für „fortschrittliche Biokraftstoffe“ von 0,5 %, Obergrenze für konventionelle Biokraftstoffe 7 %.
 - Verpflichtungsübertragung als Quasi-Quotenhandel und Festlegung von Ausgleichszahlungen bei Zielverfehlung.

Anforderungen an die Nachhaltigkeit

Im Kontext zu Nachhaltigkeit sind unterschiedliche Kriterien für biogene Kraftstoffe definiert worden. So gilt ein Anbauverbot auf Flächen mit hoher Artenvielfalt oder hohem Kohlenstoffspeicher (z. B. Regenwald). Ein zentraler Bestandteil der Nachhaltigkeitsanforderungen ist die nahtlose Rückverfolgung vom Anbau bis zum Treibstoff, die mittels Massenbilanz garantiert wird. Außerdem müssen

Biokraftstoffe entlang der Prozesskette gegenüber einem fossilen Referenzwert mindestens 50 % THG und mehr einsparen.

Die Einhaltung dieser Kriterien wird mittels Zertifizierungssystemen gewährleistet. In Österreich bildet e1Na, das elektronische Monitoringsystem von nachhaltigen Biokraftstoffen, eine weitere Kontrollinstanz und ermöglicht neben den Arbeiten der Zertifizierungssysteme zusätzliche Vor-Ort-Kontrollen sowie laufende Plausibilitätsprüfungen der eingegebenen Daten.

4.2.2 Arten biogener Kraftstoffe

Aus Biomasse und ihren unterschiedlichen pflanzlichen und tierischen biologisch abbaubaren Abfallprodukten können flüssige oder gasförmige Biokraftstoffe hergestellt werden (KERDONCUFF 2008).

„**Biomasse**“ ist der biologisch abbaubare Teil von Erzeugnissen, Abfällen und Reststoffen der Landwirtschaft mit biologischem Ursprung (einschließlich pflanzlicher und tierischer Stoffe), der Forstwirtschaft und damit verbundener Wirtschaftszweige einschließlich der Fischerei und der Aquakultur sowie der biologisch abbaubare Teil von Abfällen aus Industrie und Haushalten;

„**Biokraftstoffe**“ sind flüssige oder gasförmige Kraftstoffe für den Verkehr, die aus Biomasse hergestellt werden. Unter den Begriff „Biokraftstoffe“ fallen insbesondere nachfolgende Erzeugnisse, sofern diese als Kraftstoff oder Kraftstoffbestandteil zum Betrieb von Fahrzeugverbrennungsmotoren verwendet werden:

Biogas (Biomethan)

Durch die Fermentation von organischen Stoffen entsteht Biogas. Zu den Rohstoffen zählen landwirtschaftliche Produkte (z. B. Gülle, Mist, Mais, Gras) und gewerbliche Quellen (z. B. Bioabfälle, Speisereste, Schlachthofabfall, Fette, Obst- und Gemüseabfälle, Klärschlämme, Kompost, proteinreiche Industrieabwässer, kohlenhydratreiche Industrieabwässer, Fettabscheiderrückstände). Für die Aufbereitung als Treibstoff müssen einzelne Elemente entfernt und der Methangehalt gesteigert werden (PÖLZ & SALCHENEGGER 2005).

Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Jegliche Substrate verwendbar, vor allem Reststoffe ● Nebenprodukt hochwertiger Dünger
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Die Produktion ist nur dezentral möglich ● Für die Verteilung ist eine Anbindung an Erdgasnetz erforderlich (Aufbereitung auf Erdgasqualität)
Information	<ul style="list-style-type: none"> ● Biogas wird in Österreich größtenteils zur Strom- und Wärmeproduktion verwendet – der Einsatz im Verkehr ist vergleichsweise gering ● Einsatz in SNF und anderen großmotorigen Anwendungen (Off-Road) ● In Österreich ist keine entsprechende Flotte im PKW-Bereich vorhanden

*Tabelle 2:
Kurzbeschreibung
Biogas.*

Biodiesel

Der flüssige Kraftstoff Biodiesel FAME (Fettsäuremethylester) wird aus ölhaltigen Rohstoffen durch Veresterung erzeugt. Neben Frischölen wie Raps-, Soja-, Sonnenblumen- und Palmöl können auch Abfallprodukte wie Altspeiseöle oder tierische Fette eingesetzt werden.

Neben der Beimengung zu handelsüblichem Diesel im Ausmaß von 7 % (vol) ist der Einsatz von höheren Mischverhältnissen nur nach entsprechender Adaption der Fahrzeuge möglich.

Tabelle 3:
Kurzbeschreibung
Biodiesel.

Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Ist bereits aktuell ein etablierter Kraftstoff – in Beimengung sowie pur Nebenprodukte als Futtermittel
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Die Beimengung ist derzeit nur bis 10 % möglich (Kraftstoffnorm, Herstellerfreigaben)
Information	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz als Beimischung zu fossilem Diesel, daher ist die Entwicklung maßgeblich analog zu diesem Auch purer Einsatz ist möglich, vor allem bis 2030 – danach könnte eine Verschiebung in Richtung HVO erfolgen (problemloser betreffend Lagerfähigkeit und Einsatzmöglichkeit)

Bio-ETBE und Bioethanol

Für die Herstellung des flüssigen Biokraftstoffes Bioethanol werden aktuell stärkehaltige Pflanzen (z. B. Getreide, Mais, Kartoffeln) und zuckerhaltige Pflanzen (z. B. Zuckerrohr oder -rüben) herangezogen. Die Rohstoffe werden zerkleinert, unter Zugabe von Wasser und Enzymen erhitzt und auf diese Weise in fermentierbaren Zucker umgewandelt. Bei der Vergärung wird der Zucker in Bioethanol und CO₂ umgewandelt. In einem letzten Schritt wird das Gemisch destilliert und erreicht seinen Reinheitsgrad. (KERDONCUFF 2008).

Bei der Bioethanol-Beimischung handelt es sich um aufbereitetes Bioethanol, das zu herkömmlichem Benzin zu 5 % (E5) bis 10 % (E10) beigemischt werden kann. Superethanol E85 ist ein Kraftstoffgemisch, welches zu 85 % aus Bioethanol und 15 % aus Superbenzin besteht.

Tabelle 4:
Kurzbeschreibung Bio-
ETBE und Bioethanol.

Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Ist bereits aktuell ein etablierter Kraftstoff – in Beimengung sowie pur Nebenprodukte als Futtermittel
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Die Beimengung ist derzeit nur bis 10 % möglich (Kraftstoffnorm, Herstellerfreigaben)
Information	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz als Beimischung zu fossilem Benzin, daher Entwicklung analog dazu – auch purer Einsatz in FFV möglich

Pflanzenöl

Pflanzenöl (z. B. Rapsöl, Sonnenblumenöl, Olivenöl, Sojaöl, Palmöl etc.) kann mittels Kaltpressung (bei Temperaturen von 40 °C mit anschließender Filtration bzw. Sedimentation) oder Raffination (Pressung bei Temperaturen von 80 °C und Extraktion mittels Lösemitteln) hergestellt werden. Pflanzenöl kann aber auch aus Abfällen erzeugt werden.

Der Einsatz des Pflanzenöls in herkömmlichen Verbrennungsmotoren ist im Vergleich zu Dieselmotoren kostenaufwendig, da Anpassungsmaßnahmen vorgenommen werden müssen. Zudem ist Pflanzenöl schwer entflammbar und hat eine geringere Zündwilligkeit (KERDONCUFF 2008).

Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Eigenerzeugung im landwirtschaftlichen Sektor möglich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Fahrzeuge müssen für den Einsatz von Pflanzenölkraftstoff entsprechend adaptiert werden
Information	<ul style="list-style-type: none"> ● Verwendung im Off-Road-Bereich und bei Nutzfahrzeugen, da fahrerseitige Adaption erst bei höherem Treibstoffeinsatz wirtschaftlich

*Tabelle 5:
Kurzbeschreibung
Pflanzenöl.*

Hydriertes Pflanzenöl

Bei der Herstellung von hydrierten Pflanzenölen (HVO – Hydrogenated Vegetable Oils) werden Pflanzenöle in Kohlenwasserstoffe (durch Zugabe von Wasserstoff) umgewandelt. Zur Anwendung kommen HVO als Reinkraftstoff oder in Beimischungen (SCHERR 2016).

Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Hohe Kraftstoffqualität ● Bereits aktuell etablierter Kraftstoff – in Beimischung sowie pur ● Nebenprodukte als Futtermittel
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Höheres Absatzpotenzial, aber dadurch auch höherer Preis im Vergleich zu Biodiesel
Information	<ul style="list-style-type: none"> ● Aktuell praktisch keine großtechnischen Anlagen vorhanden. Energieaufwand und damit Gestehungskosten zu hoch

*Tabelle 6:
Kurzbeschreibung
Hydriertes Pflanzenöl.*

Synthetischer Kraftstoff aus Biomasse

Synthetische Kraftstoffe können direkt über Biomasse gewonnen werden. In einem ersten Schritt erfolgt die Biomassevergasung, bei der die Biomasse zu einem Synthesegas, welches überwiegend aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff besteht, umgewandelt wird (Biomass to Gas). Für die Biomasseverflüssigung wird das Synthesegas mittels des Fischer-Tropsch-Verfahrens bei Temperaturen von über 300 °C (und einem Druck von 1–100 bar) in sauerstoffhaltige Verbindungen und Kohlenwasserstoffe verwandelt. Nach abschließender Destillation wird der flüssige synthetische Kraftstoff (Biomass to Fuel) gewonnen (WIND & PILLES 2012).

Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Umwandlung jeglicher Biomasse über Synthesegas in Kraftstoff möglich ● Hervorragende Kraftstoffqualität gegeben
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ● Herstellungsaufwand rein energetisch sehr hoch, schlechtes Input-Output-Verhältnis ● Keine Nebenprodukte
Information	<ul style="list-style-type: none"> ● Vor allem durch die Verwendung von biogenen Reststoffen (Bio-Raffinerie) in stationären Anwendungen und im SNF

*Tabelle 7:
Kurzbeschreibung
synthetischer Kraftstoff
aus Biomasse.*

4.3 Konventionelle Kraftstoffe

Flüssige Kraftstoffe

Für die Herstellung von flüssigen Kraftstoffen kommen fossile und erneuerbare Rohstoffe zum Einsatz. Diese werden in verschiedenen chemischen Verfahren zu Brenn- und Kraftstoffen für herkömmliche Verbrennungsmotoren (englisch: Internal Combustion Engine, kurz: ICE) weiterverarbeitet.

Die Grundlage der Kraftstoffe Benzin, Diesel und LPG (Liquified Petroleum Gas) bildet Erdöl. Rohöl, das gereinigte Erdöl, besteht aus unterschiedlichen Kohlenstoffverbindungen. Durch das Destillieren (Erhitzen) des Rohöls werden die Kraftstoffe voneinander getrennt.

LPG fällt als Nebenprodukt bei der Raffination (bei ca. 40 °C Temperatur) von Rohöl an. Es wird unter Druck verflüssigt und als LPG bzw. Autogas getankt.

Benzin kann bei ca. 150–180 °C, Diesel bei ca. 350 °C weiterveredelt werden. Durch die langkettigen Kohlenstoffverbindungen verfügt Diesel über einen höheren Energiegehalt, wodurch bei der Verbrennung wiederum höhere CO₂-Emissionen anfallen (SPIEGEL 2012).

Gasförmige Kraftstoffe

Die Rohstoffe gasförmiger Kraftstoffe bilden Erdgas und Biomasse. Der fossile Rohstoff Erdgas wird aus dem Erdinneren gefördert und besteht zu 90 % aus Methan. Biogas (Biomethan) wird hingegen aus der Vergärung von Biomasse gewonnen.

Im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen besitzt Gas eine geringere volumetrische Energiedichte. Möglichkeiten zur Erhöhung der Energiedichte von Erdgas bestehen in der Komprimierung zu CNG (Compressed Natural Gas) oder der Verflüssigung zu LNG (Liquified Natural Gas). Die Komprimierung ist kostengünstiger als die Verflüssigung. Diese Verfahren werden bei schweren Nutzfahrzeugen (z. B. LKW oder Reisebussen) eingesetzt, die lange Strecken zurücklegen müssen (EFLOG 2014).

4.4 Überblick an Antriebsformen und Kraftstoffen

In nachfolgender Abbildung 16 sind die Verkettungen der Well-to-Wheel Betrachtung im straßengebundenen Verkehr veranschaulicht. Fossile und erneuerbare Energiequellen werden bei unterschiedlichen Antriebsformen und Fahrzeugtechnologien eingesetzt und zum Teil noch kombiniert. Für einen klimaneutralen Verkehrssektor ist ein Ausstieg aus den fossilen Energieträgern notwendig.

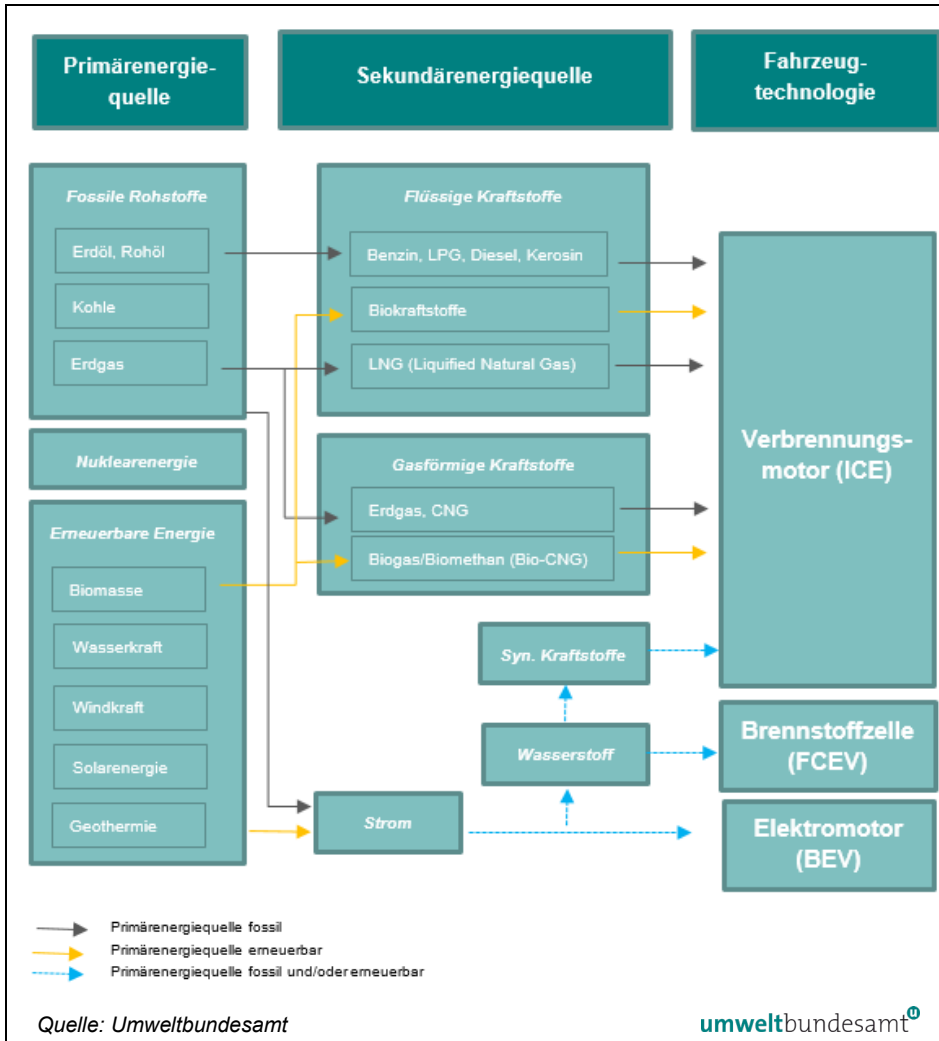


Abbildung 16: Überblick Antriebsformen und Kraftstoffe im straßengebundenen Verkehr

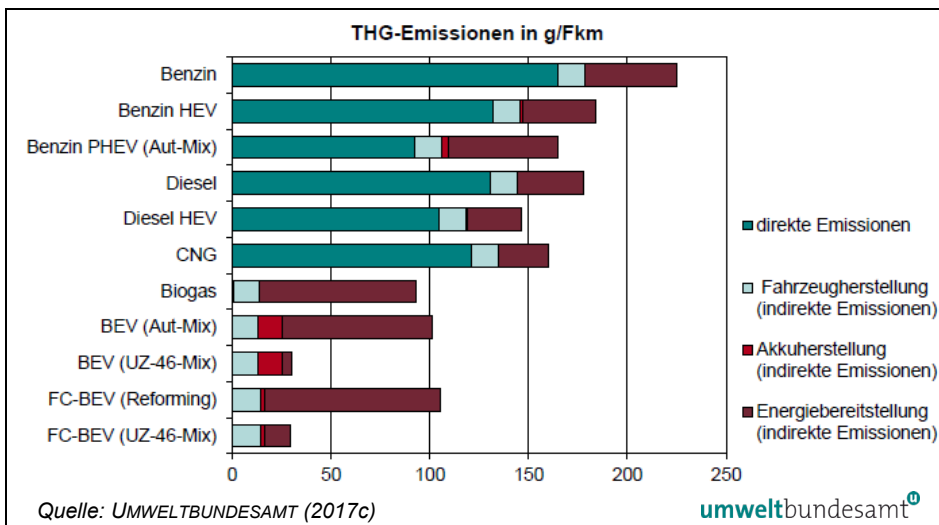


Abbildung 17: Gesamte THG-Emissionen in g CO₂-eq pro Fahrzeugkilometer verschiedener PKW-Antriebsarten

Abbildung 17 zeigt, dass konventionelle fossil betriebene Fahrzeuge die meisten Treibhausgas-Emissionen verursachen, wobei die direkten Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung den größten Beitrag liefern. Treibhausgas-Emissionen

sind in erster Linie CO₂-Emissionen, ebenfalls dazu zählen andere klimawirksame Gase (wie z. B. Methan oder Lachgas), die über einen Umrechnungsfaktor (über das sogenannte Global Warming Potenzial) in CO₂-eq-Emissionen konvertiert werden.

Ein elektrischer Fahranteil von 44 % verringert zwar die direkten Emissionen des Benzin PHEV, dennoch werden beinahe 100 g CO₂-eq/Fkm ausgestoßen.

**Strom aus
erneuerbaren
Energiequellen**

Ein klarer Klimavorteil bei den elektrischen Antrieben (BEV und FC-BEV) ist dann gegeben, wenn für die Energiebereitstellung Strom aus erneuerbaren Quellen (etwa nach Umweltzeichen 46) herangezogen wird: im Vergleich zum rein fossilen Benzin-PKW um 86 bzw. 87 % weniger THG-Emissionen, im Vergleich zum rein fossilen Diesel um 83 bzw. 84 %.

Bei der Fahrzeugherstellung unterscheiden sich die Treibhaus-Emissionen nur marginal.

Die Akkuherstellung eines BEV bedingt ähnlich viele Emissionen wie die restliche Fahrzeugherstellung.

Bei Biogas ist der Methanschluß in der Herstellungskette die prägende THG-Quelle. Dieser lässt sich technisch um ca. 50 % reduzieren, dadurch kann die Bilanz für die Biogas-PKW deutlich besser ausfallen.

4.5 Use-Cases: Mögliche Antriebsformen im Verkehrssektor

Use-Cases ERS

Die dynamische Lade- und Antriebsinfrastruktur kann für alle elektrifizierten Antriebsstränge im höherrangigen Straßennetz bzw. auf ausgewählten Autobahnen und Schnellstraßenabschnitten implementiert werden. Oberleitungssysteme stellen auch im städtischen Gebiet, vor allem beim öffentlichen Verkehr (Stadtbusse), eine Ergänzung zum batterieelektrischen Antrieb dar.

Use-Cases batterieelektrischer Antrieb

PKW Wesentliches und wichtiges Einsatzgebiet des batterieelektrischen Antriebes ist der motorisierte Individualverkehr (PKW und Zweiräder).

Im Logistikbereich spielt der batterieelektrische Antrieb bei den leichten Nutzfahrzeugen eine wichtige Rolle. Für die Verteil- und Distributionsverkehre auf der Last-Mile ist die Batterie ebenfalls gut geeignet.

Busse und LKW Busse für den öffentlichen Verkehr (z. B. Stadt- und Regionalbusse) mit kürzeren Reichweiten (50–150 km) können batterieelektrisch angetrieben werden, wobei eine Kombination mit Oberleitungssystemen oder bei weiteren Reichweiten mit der Wasserstoff-Brennstoffzelle im möglichen Bereich liegen.

Im Off-Road-Bereich ist zum Beispiel der Bagger ein guter Anwendungsfall. Im Güterumschlag können vor allem Stapler im Lager batterieelektrisch betrieben werden.

Use-Cases Wasserstoff-Brennstoffzelle

Im PKW-Bereich kann bei Taxidiensten durch den Schichtbetrieb die Brennstoffzelle eingesetzt werden. Das Erfordernis der kurzen Betankungsdauer bei gleichzeitig Tagesreichweiten von mehreren 100 km stellt die Brennstoffzelle eine passende Technologie dar, um emissionsfrei in Städten unterwegs zu sein.

PKW

Die Brennstoffzelle stellt für leistungsstarke Busse und LKW, insbesondere im Schwerverkehr (> 12 Tonnen) ein sinnvolles Einsatzgebiet dar. Mit emissionsfreien Antrieben können Reichweiten über 150 oder 200 km erzielt werden, wie die der heutigen Dieselbusse. Der Vorteil von Wasserstoff ist die höhere Energiedichte im Vergleich zur Batterie. In den genannten Fahrzeugsegmenten kann man daher nach wie vor eine hohe Güterleistung realisieren, da weniger Platz und Gewicht für das Antriebssystem gebraucht wird und mehr Transportvolumen generiert werden kann (im Vergleich zur Batterie). Die Wasserstoff-Brennstoffzelle als erneuerbare Technologie ermöglicht es mit derselben Flexibilität und Reichweite fossil betriebener Verbrennerfahrzeuge die konventionellen Fahrzeuge zu ersetzen.

Busse und LKW

Auf der Straße gibt es viele Spezialfahrzeuge, für die der Wasserstoff eine interessante Alternative darstellt. Beispielsweise zählen Kommunalfahrzeuge wie Müllwägen (hoher Energieverbrauch aufgrund des Gewichtes und der Müllpressen) oder Reinigungsfahrzeuge, die eine hohe Laufleistung haben, dazu. Aber auch Fahrzeuge im Dauerkaltbetrieb wie Schneemobile und Pistenraupen oder Fahrzeuge im energieintensiven Off-Road-Bereich (z. B. Bagger) können mit der Wasserstofftechnologie abgedeckt werden.

Spezialfahrzeuge

Züge sind ähnlich wie der Heavy-Duty-Bereich ein wichtiger Use-Case für Wasserstoff. Voraussetzung ist, dass die Schiene noch nicht elektrifiziert ist. Die Investitionen in schienengebundene Oberleitungen sind sehr kostenintensiv, die Wasserstoff-Brennstoffzelle kann vor allem auf der ökonomischen Ebene Vorteile schaffen. So ist die Verschubtätigkeit, die derzeit mit Diesel abgewickelt wird, ein gutes Segment für den Einsatz der Brennstoffzelle.

Schiene

Im schiffgebundenen Verkehr mit wenigen hundert Kilometern (z. B. Fähren oder Binnenschiffe) kann Wasserstoff on-board zur Speicherung, zum Teil gasförmig, zum Teil auch flüssig, eingesetzt werden. Die Marine (z. B. deutsche U-Boote) stellt ebenfalls einen Anwendungsfall dar.

Schifffahrt

Beim Umschlag mit schweren Gütern wie zum Beispiel Containern kann der (Portal-)Kran mit Wasserstoff betrieben werden. Durch die schnelle Betankung können Stillstandzeiten reduziert und ein ökonomischer Betrieb gewährleistet werden.

Use-Cases Synthetische Kraftstoffe

Verkehre mit sehr weiten Distanzen und hohen Energiedichten benötigen synthetische Kraftstoffe. Die Hochseeschifffahrt und der Flugverkehr (v. a. für Linienverkehre) sind solche Use-Cases für synthetische Kraftstoffe.

**Hochseeschifffahrt
und Flugverkehr**

*Tabelle 8:
potenzielle Use-Cases
von alternativen
Antriebsformen und
Kraftstoffen*

		Electric Road System	Batterie elektrisch	Wasserstoff-Brennstoffzelle	Synthetische Kraftstoffe	Bio-Kraftstoffe
Straße	PKW		X	X	X	
	LNF		X	X	X	
	SNF < 18 t		X	X	X	X
	SNF > 18 t	X	X	X	X	X
	Reisebus	X	X	X	X	X
	Stadtbus	X	X	X	X	X
	Zweirad		X		X	
Schiene		X		X		
Wasserstraße			X		X	X
Luft					X	X
Off-Road			X		X	X

5 ENTWICKLUNGSPFAD UND MENGENGERÜST

5.1 Rahmenbedingungen und Annahmen

Basierend auf nationalen und internationalen Zielsetzungen sowie strategischen Dokumenten (z. B. #mission2030, NEKP) werden klimaneutrale Energiepfade entwickelt:

- Reduzierung der THG-Emissionen bis 2030 um 36 % gegenüber 2005
- Reduktion der THG-Emissionen des Verkehrs um rund 7,2 Millionen Tonnen CO₂ auf rund 15,7 Millionen Tonnen CO₂

Berücksichtigt wird auch das aktuelle Regierungsprogramm 2020–2024, welches das Ziel formuliert hat, Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 zu erreichen.

Bei der Erarbeitung des Entwicklungspfades und der erforderlichen Energiemengen ist eine Well-to-Wheel-Betrachtung, d. h. Energieaufwendungen bei der Energieherstellung, -distribution, -bereitstellung und beim Energieverbrauch zugrunde gelegt. Alternative Antriebsformen und Kraftstoffe sollen aus erneuerbaren Energien (Wind- und Wasserkraft sowie Sonnen- und Bioenergie) hergestellt werden. Unter der Prämisse der Energieeffizienz wird ein optimaler Mix von Elektrizität, Wasserstoff und biogenen sowie synthetischen Kraftstoffen für den Verkehrssektor erarbeitet.

Nach den Fragestellungen „Wie kann man am effizientesten und effektivsten das bestehende System transferieren (Stichwort bestehendes Gasnetz)? Welcher Antriebsmix ist energietechnisch am sinnvollsten?“ werden der Entwicklungspfad und das Energie-Mengengerüst erarbeitet. Limitierender Faktor ist dabei die zur Verfügung stehende Energiemenge bis 2050.

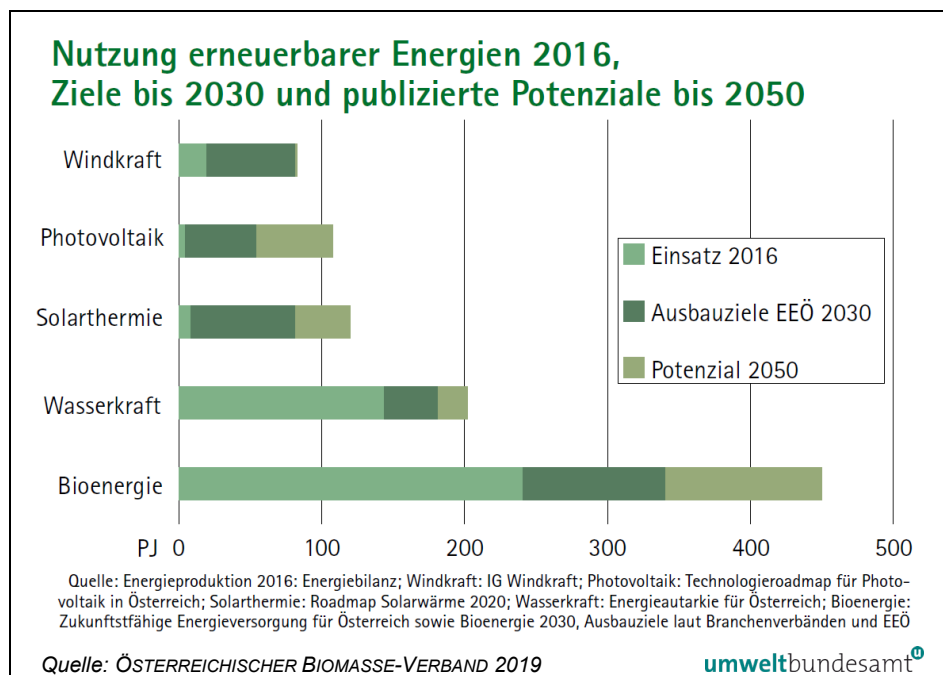


Abbildung 18:
Nutzung erneuerbarer
Energien 2016, Ziele bis
2030 und publizierte
Potenziale bis 2050.

**Biomasse mit
großem
Ausbaupotenzial**

Wie in Abbildung 18 dargestellt, birgt die Biomasse bis zum Jahr 2050 die größten Ausbaupotenziale. Mittelfristig (2030 bis 2040) spielt Bioenergie eine entscheidende Rolle zur Erreichung der Klimaneutralität, biogene Kraftstoffe stellen im Verkehrssektor außerdem auch eine Übergangs- bzw. Brückentechnologie dar.

Das Biogaspotenzial, insbesondere aus Gülle, wobei die Methanausbringung am Feld vermieden wird, wird als hoch eingestuft, da die bestehende Infrastruktur im Bereich der Produktion (Biogasanlagen) als auch in der Verteilung (Distributionsnetz und Tankstellen) genutzt werden kann. Auf der langfristigen Ebene (bis 2050) wird Strom aus Solar- und Windkraft (sowie Wasserkraft) für die Erzeugung von alternativen Antrieben eingesetzt werden.

Die potenziell verfügbaren Energiemengen aus Literaturrecherche und Interviewgesprächen werden herangezogen und mit den Energiemengen des energiewirtschaftlichen Szenarios Transition aus dem Jahr 2017 des Umweltbundesamtes verschnitten (KRUTZLER et al. 2017). Der Bruttoinlandsverbrauch (BIV) bzw. die Energiemengen für die Sektoren Industrie, Haushalte, Dienstleistungen und Landwirtschaft werden herausgerechnet. Für den Verkehrssektor werden die erforderlichen Energiemengen im Zuge des Entwicklungspfad für die Klimaneutralität 2050 im Detail berechnet. Im Energie-Mengengerüst finden sich folgende Energiemengen für einen klimaneutralen Verkehrssektor:

- Primärenergiemenge ist die von natürlichen noch nicht weiterverarbeiteten Energieträgern stammende Energie.
- Energetischer Endverbrauch ist die Energiemenge, die dem Verbraucher/der Verbraucherin für die Umsetzung in Nutzenergie zur Verfügung gestellt wird.

**energetischer
Endverbrauch**

Basis für die Primärenergieberechnungen ist der energetische Endverbrauch des erarbeiteten Entwicklungspfad. Über den zugrunde liegenden Antriebs- und TechnologiemiX wird mittels des spezifischen Verbrauchs je Fahrzeugkilometer der energetische Endverbrauch errechnet. Mit den aus der Literatur ermittelten Wirkungsgraden (Well-to-Tank und Tank-to-Wheel) wird (1) der energetische Endverbrauch an strombasierten, biogenen und fossilen Energiequellen und (2) die benötigten Primärenergiemengen ermittelt.

Die berechneten Primärenergiemengen für die Sektoren Industrie, Haushalte, Dienstleistungen und Landwirtschaft (ohne Verkehr) werden vom Potenzial an Primärenergie lt. Interviews abgezogen. Somit ergibt sich die Primärenergiemenge für den Verkehrssektor, die den limitierenden Faktor für den zugrunde liegenden Antriebs- und TechnologiemiX bildet.

Abbildung 19:
Energieberechnung
Vorgehensweise



5.2 Entwicklungspfad und Mengengerüst Klimaneutralität 2050

Unter der Prämisse einer Gesamtsystemeffizienz sind daher insbesondere die Entwicklungsmöglichkeiten bis 2050 zu beleuchten und dahingehend zu untersuchen, welche alternativen Antriebsformen bzw. biogenen Kraftstoffe im Verkehrssystem 2050 zum Einsatz kommen werden. Dabei stellen sich die beiden Fragen, was man gut im kurz-, mittel- und langfristigen Zeitraum entsprechend den vorhandenen Energiemengen umsetzen kann und wie das Ziel erreicht werden soll.

Es werden sich jene Antriebsformen und Kraftstoffe durchsetzen, welche am effizientesten sind. Das effizienteste System muss jedoch nicht unmittelbar das am Markt übliche sein. Daher ist insbesondere die Politik gefragt, richtungsweisende Rahmenbedingungen in einem langfristigen Zeithorizont zu setzen – nicht nur auf nationaler, sondern auf europäischer Ebene. Diese Regularien sollen sehr rasch und europaweit strikt zur Anwendung kommen. So ist beispielsweise die Infrastrukturentwicklung der Oberleitung im europäischen Kontext denkbar und sinnvoll.

effiziente Systeme

Pro Fahrzeugkategorie bzw. Verkehrsmittel werden sich (aus ökonomischen und infrastrukturellen Gründen) zwei bis maximal drei Technologien bzw. Antriebsformen durchsetzen.

5.2.1 Entwicklungspfad Endenergie Verkehr (inkl. Flug 2050)

Der Straßenverkehr erfolgt überwiegend elektrisch. PKW und LNF werden überwiegend batterieelektrisch angetrieben werden, wobei hier die Wasserstofftechnologie ein Einsatzgebiet darstellt. Das Batteriesystem hat im Vergleich zu synthetischen Kraftstoffen einen sehr hohen Wirkungsgrad, wodurch der motorisierte Individualverkehr vollständig defossilisiert und dekarbonisiert werden kann.

Vor allem im Heavy-Duty-Bereich wird eine Kombination aus Wasserstofftechnologie und Electric Road Systems mit batterieelektrischen Antrieb zum Einsatz kommen (Parallelinfrastruktur). Die Oberleitung ist eine sehr effiziente Möglichkeit, jedoch ist die Infrastrukturerrichtung aufwendig und teuer. Umso mehr sind daher übergeordnete politische Rahmenbedingungen notwendig. Mitzudenken ist außerdem, dass sich die Errichtung der Oberleitungs-Infrastruktur unter Umständen auf den Fahrpreis auswirken könnte, d. h. nutzungsabhängige Gebühren.

Insbesondere Stadtbusse werden künftig über die Oberleitung betrieben werden, wobei Stadt- und Reisebusse neben der Oberleitung auch mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge verkehren werden.

Die Schiene wird zum Großteil über die Oberleitung betrieben werden, wobei jeweils 5 % (auf die Kilometer bezogen) mit Wasserstoffantrieb und batterieelektrischem Antrieb abgewickelt werden.

Bei der Wasserstraße und im Luftverkehr kommen synthetische Kraftstoffe zum Einsatz. Im Off-Road-Bereich sind rund 48 % batterieelektrisch (z. B. Baufahrzeuge, Aggregate) und 52 % biogen (z. B. Forst- und Landwirtschaft).

Tabelle 9: Entwicklungspfad Klimaneutralität 2050 [TJ] (Quelle: Umweltbundesamt)

		Alternative Antriebe und biogene Kraftstoffe										Summe
		Electric Road System	Batterie elektrisch	Wasserstoff-Brennstoffzelle	SynFuel Strom	SynFuel biogen	Biogas	Biodiesel	Bio-ETBE & Ethanol	HVO	Pflanzenöl	
Straße	PKW	0	33.212	1.084	0	0	0	0	0	0	0	34.296
	LNF	0	6.409	201	0	0	0	0	0	0	0	6.609
	SNF < 18t	0	3.695	239	0	0	0	0	0	0	0	3.933
	SNF > 18t	14.070	5.628	7.610	0	0	0	0	0	0	0	27.307
	Reisebus	1.120	1.267	1.365	0	0	0	0	0	0	0	3.752
	Stadtbus	93	474	198	0	0	0	0	0	0	0	765
	Zweirad	0	1.056	0	0	0	0	0	0	0	0	1.056
Schiene		13.832	0	508	0	0	0	0	0	0	0	14.340
Wasserstraße		0	83	0	200	745	0	0	0	0	0	1.028
Luft		0	0	0	11.843	9.690	0	0	0	0	0	21.533
Off-Road		0	7.587	0	0	1.500	500	1.500	2.650	1.500	500	15.737
Summe		29.115	59.411	11.204	12.043	11.934	500	1.500	2.650	1.500	500	130.357

Die Reduktion der Endenergiemenge im Verkehr auf rund 130 PJ gemäß Tabelle 9 setzt dabei folgende Ziele für emissionsfreie Neuzulassungen voraus: PKW: ab 2027, LNF: ab 2030, Busse: ab 2030; SNF < 18 Tonnen hzGg: ab 2030; SNF > 18 Tonnen hzGg: ab 2035. Darüber hinaus werden Maßnahmen getroffen, die ein Ausscheiden des verbrennungsmotorisch angetriebenen Altbestandes bis 2040/2050 zur Folge haben.

In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist die Entwicklung alternativer Antriebsformen und Kraftstoffe im Zeitraum 2020 bis 2050 veranschaulicht. Die fossilen Kraftstoffe werden im Jahr 2050 nicht mehr eingesetzt. Bei den alternativen Antrieben ist ein starker Anstieg von leitungsgebundenen Systemen sowie batterieelektrischen Antrieben zu verzeichnen.

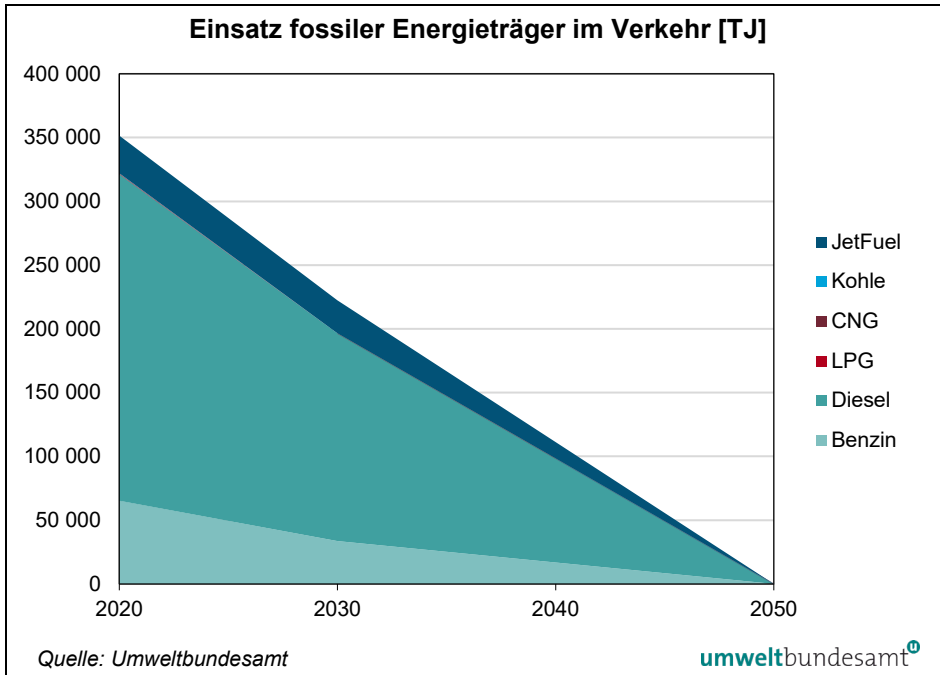


Abbildung 20:
Einsatz fossiler Kraftstoffe im Verkehr Klimaneutralität 2050 [TJ]

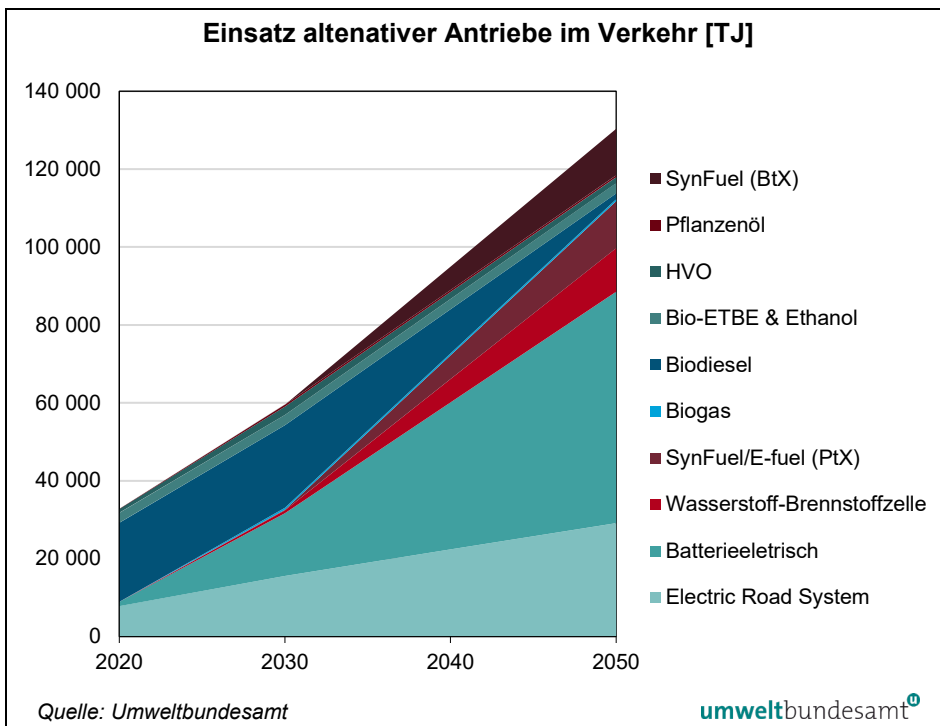


Abbildung 21:
Einsatz alternativer Antriebe im Verkehr Klimaneutralität 2050 [TJ]

5.2.2 Primärenergiebedarf (inkl. Flug 2050)

**energetischer
Endverbrauch
– 66 %**

Durch den angestrebten Antriebsmix und die zugrunde gelegten Energieeffizienzen bzw. Wirkungsgrade im Entwicklungspfad kann beim energetischen Endverbrauch bis zum Jahr 2050 eine Reduktion von rund 66 % erreicht werden. Die Energiemenge für den Verkehrssektor beläuft sich im Jahr 2050 auf rund 130 PJ. Der energetische Endverbrauch ist dabei die Energiemenge, die dem Verbraucher/der Verbraucherin für die Umsetzung in Nutzenergie zur Verfügung steht. Zu betrachten ist neben dem energetischen Endverbrauch auch die erforderliche Primärenergiemenge. Diese ist definiert als von natürlichen noch nicht weiterverarbeitenden Energieträgern (z. B. Öl, Biomasse, sonstige Erneuerbare) stammende Energie. Von dieser ergibt sich durch Transport- und Umwandlungsverluste der zur Verfügung stehende energetische Endverbrauch.

Die Primärenergiemenge reduziert sich im Betrachtungszeitraum von 413 PJ auf 172 PJ. Dabei verändern sich die Energieträger stark. Fossile Energieträger, die im Jahr 2020 noch über 90 % der Primärenergiebereitstellung ausmachen, spielen im Jahr 2050 keine Rolle mehr. Dafür kommt es zu einem starken Anstieg Erneuerbarer (d. h. erneuerbare Energieträger, aus denen Strom gemacht wird). Diese steigen um den Faktor 9.

Tabelle 10:
Energienmengengerüst
Klimaneutralität 2050
[TJ];
Darstellung:
Umweltbundesamt.

	2020	2030	2050
Energ. Endverbrauch Verkehr TJ	384.225	282.208	130.357
Kohle	4	0	0
Öl	369.879	243.856	0
Gas	6.089	3.289	0
Biomasse	20.902	20.989	23.699
Sonstige Erneuerbare	16.778	46.255	148.318
Primärenergie Verkehr TJ	413.653	314.389	172.017
Verkehr	413.653	314.389	172.017
Haushalte	296.800	256.990	185.701
Dienstleistungen	124.326	106.595	79.286
Landwirtschaft	13.172	12.629	12.774
Industrie	513.432	475.658	387.933
Gesamte Primärenergie TJ	1,361.382	1,166.261	837.712

5.2.3 Entwicklungspfad Endenergie Verkehr (exkl. Flug 2050)

Der in Kap. 5.2.1 erarbeitete Entwicklungspfad Energie im Verkehr ist im Jahr 2050 um den Flugverkehr reduziert worden. Der energetische Endverbrauch des Flugverkehrs liegt somit statt bei 21 533 TJ auf 0 TJ. Durch den Wegfall der synthetischen Kraftstoffe im Flugverkehr ergibt sich ein energetischer Endverbrauch von rd. 109 PJ. Dies hat Auswirkungen auf den energetischen Endverbrauch im Verkehr und insbesondere bei der Primärenergiemenge.

Tabelle 11: Entwicklungspfad Klimaneutralität 2050 exkl. Flugverkehr 2050 [TJ];
Darstellung: Umweltbundesamt.

		Alternative Antriebe und biogene Kraftstoffe										Summe
		Electric Road System	Batterie elektrisch	Wasserstoff-Brennstoffzelle	SynFuel Strom	SynFuel biogen	Biogas	Biodiesel	Bio-ETBE & Ethanol	HVO	Pflanzenöl	
Straße	PKW	0	33.212	1.084	0	0	0	0	0	0	0	34.296
	LNF	0	6.409	201	0	0	0	0	0	0	0	6.609
	SNF < 18 t	0	3.695	239	0	0	0	0	0	0	0	3.933
	SNF > 18 t	14.070	5.628	7.610	0	0	0	0	0	0	0	27.307
	Reisebus	1.120	1.267	1.365	0	0	0	0	0	0	0	3.752
	Stadtbus	93	474	198	0	0	0	0	0	0	0	765
	Zweirad	0	1.056	0	0	0	0	0	0	0	0	1.056
Schiene		13.832	0	508	0	0	0	0	0	0	0	14.340
Wasserstraße		0	83	0	200	745	0	0	0	0	0	1.028
Luft		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Off-Road		0	7.587	0	0	1.500	500	1.500	2.650	1.500	500	15.737
Summe		29.115	59.411	11.204	200	2.245	500	1.500	2.650	1.500	500	108.825

5.2.4 Primärenergiebedarf (exkl. Flug 2050)

Durch den angestrebten Antriebsmix und die zugrunde gelegten Energieeffizienzen bzw. Wirkungsgrade im Entwicklungspfad kann beim energetischen Endverbrauch bis zum Jahr 2050 eine Reduktion von rund 72 % erreicht werden. Die Energiemenge für den Verkehrssektor beläuft sich im Jahr 2050 auf rund 109 PJ. Der energetische Endverbrauch ist dabei die Energiemenge, die dem Verbraucher/der Verbraucherin für die Umsetzung in Nutzenergie zur Verfügung steht. Zu betrachten ist neben dem energetischen Endverbrauch auch die erforderliche Primärenergiemenge. Diese ist definiert als von natürlichen noch nicht weiterverarbeitenden Energieträgern (z. B. Öl, Biomasse, sonstige Erneuerbare) stammende Energie. Von dieser ergibt sich durch Transport- und Umwandlungsverluste der zur Verfügung stehende energetische Endverbrauch.

**energetischer
Endverbrauch
– 72 %**

**Reduktion
Primärenergie**

Die Primärenergiemenge reduziert sich im Betrachtungszeitraum um 72 % von 413 PJ auf 109 PJ. Dabei verändern sich die Energieträger stark. Fossile Energieträger, die im Jahr 2020, noch über 90 % der Primärenergiebereitstellung ausmachen, spielen im Jahr 2050 keine Rolle mehr. Dafür kommt es zu einem starken Anstieg Erneuerbarer (d. h. erneuerbare Energieträger, aus denen Strom gemacht wird).

Tabelle 12:
Energienmengengerüst
Klimaneutralität 2050
exkl. Flugverkehr 2050
[TJ];
Darstellung:
Umweltbundesamt.

	2020	2030	2050 (exkl. Flug)
Energ. Endverbrauch Verkehr TJ	384.225	282.208	108.825
Kohle	4	0	0
Öl	369.879	243.856	0
Gas	6.089	3.289	0
Biomasse	20.902	20.989	9.857
Sonstige Erneuerbare	16.778	46.255	124.736
Primärenergie Verkehr TJ	413.653	314.389	134.593
Verkehr	413.653	314.389	134.593
Haushalte	296.800	256.990	185.701
Dienstleistungen	124.326	106.595	79.286
Landwirtschaft	13.172	12.629	12.774
Industrie	513.432	475.658	387.933
Gesamte Primärenergie TJ	1,361.382	1,166.261	800.287

In nachfolgender Tabelle 13 sind die Energiemengen der beiden Entwicklungspfade (1) Entwicklungspfad Klimaneutralität 2050 inkl. Flugverkehr und (2) Entwicklungspfad Klimaneutralität 2050 exkl. Flugverkehr dargestellt. Beim energetischen Endverbrauch können durch den Wegfall des Flugverkehrs rund 21,5 PJ eingespart werden, bei der Primärenergie sogar rund 37 PJ. Dies ist auf den Einsatz synthetischer Kraftstoffe im Flugverkehr zurückzuführen, die bei der Well-to-Wheel-Betrachtung einen niedrigen Wirkungsgrad aufweisen.

	2050 (exkl. Flug)	2050 (inkl. Flug)	Differenz
Kohle	0	0	0
Öl	0	0	0
Gas	0	0	0
Biomasse	9.857	23.699	13.842
Sonstige Erneuerbare	124.736	148.318	23.582
Gesamte Primärenergie	134.593	172.017	37.424
1			
Energ. Endverbrauch	108.825	130.357	21.533

Tabelle 13:
Vergleich
Energimengen 2050
inkl. und exkl.
Flugverkehr 2050 [TJ] ;
Darstellung:
Umweltbundesamt.

5.3 Klimaneutralität 2040

Abbildung 22 zeigt die mögliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen des österreichischen Verkehrssektors (inkl. Kraftstoffexport) gemäß dem Klima- und WEM-Energieszenario aus dem Jahr 2019. Demzufolge würden die verkehrsbedingten Treibhausgas-Emissionen bis 2050 lediglich auf knapp unter 20 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente sinken. Dem gegenüber sind die Zielsetzungen des Klimaschutzgesetzes (21,7 Millionen Tonnen im Jahr 2020), der Klima- und Energiestrategie #mission2030 (15,7 Millionen Tonnen im Jahr 2030) und des Pariser Klimaziels (1,2 Millionen Tonnen im Jahr 2050) abgebildet.

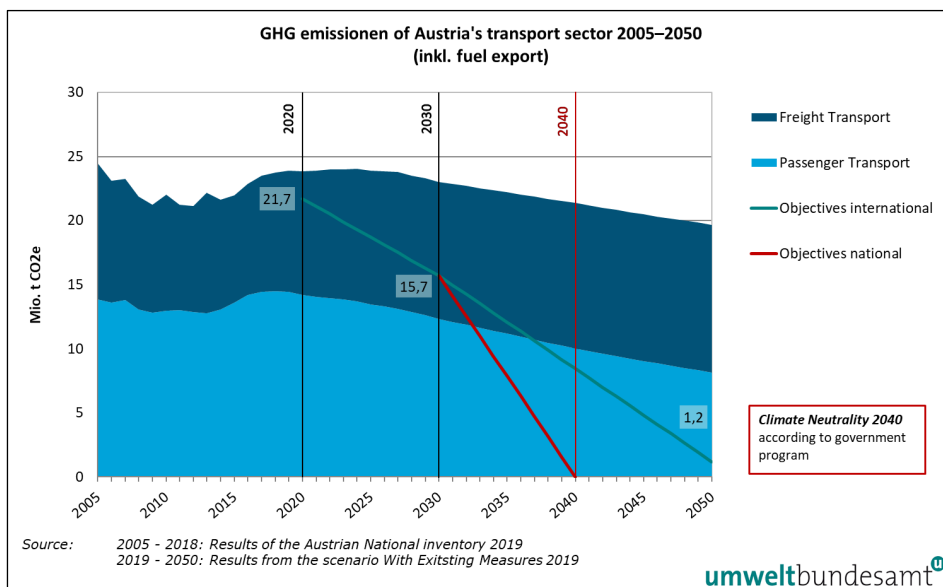


Abbildung 22:
THG-Emissionen;
Darstellung:
Umweltbundesamt.

Ursprüngliches Ziel des Projektes „Pathways to a Zero Carbon Transport Sector“ war die Erarbeitung eines Entwicklungspfades zur Darstellung der Klimaneutralität im Jahr 2050 gemäß den Pariser Klimazielen. Mit dem Regierungsprogramm 2020–2024 wurde das Ziel der Klimaneutralität um 10 Jahre vorverlegt. Ein möglicher neuer Zielpfad ist in Abbildung 22 mit roter Linie dargestellt. Vor diesem Hintergrund wurde zusätzlich die Erreichbarkeit des Ziels im Jahr 2040 qualitativ untersucht.

Reduktion der Verkehrsleistung erforderlich

Die Untersuchungen im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes haben gezeigt, dass neben der erforderlichen Reduktion der Verkehrsleistung der intensive Ausbau erneuerbarer Energien in Österreich für die Erreichung der Klimaneutralität auch im Verkehr von zentraler Bedeutung ist. Die Geschwindigkeit, in der beides – also sowohl die Reduktion der Verkehrsleistung als auch der Ausbau der erneuerbaren Energien – erreicht wird, ist abhängig von Art, Intensität und Zeitpunkt jenes Bündels an Push- und Pull-Maßnahmen, das seitens der Politik umgesetzt wird.

erreichbare Zielsetzung

Aus gesellschaftlicher, wirtschaftlicher und technologischer Sicht besteht aus Sicht des AutorInnenteams mit einem Zeithorizont von 20 Jahren noch ausreichend Zeit, um die Menge an bis 2050 in Österreich erzeugbaren erneuerbaren Energien (siehe vorangegangene Kapitel) potenziell bereits im Jahr 2040 bereitstellen zu können. Aus diesem Grund können die Kernaussagen der vorliegenden Forschungsarbeit auch für das Jahr 2040 übernommen werden. Voraussetzung dafür ist jedoch eine signifikante Intensivierung der Bestrebungen zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors auf allen Ebenen sowie hohe und rasche Investitionen in den Ausbau erneuerbarer Energien in Österreich.

5.4 Energie- und Treibhausgasmodellierung

5.4.1 Modell

Verkehrsemissionsmodell NEMO

Zur Modellierung des in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Einsatzes erneuerbarer Energien im Verkehrssektor im Hinblick auf Klimaneutralität bereits im Jahr 2040 (vgl. Kapitel 5.4) wurde das Verkehrsemissionsmodell NEMO (Network Emission Model) zum Einsatz gebracht. Dieses Modell umfasst nicht den Flugverkehr. Die dafür ausgewiesene erforderliche Energiemenge von rund 21,5 PJ im Jahr 2040 wird in diesem Kapitel nicht berücksichtigt. Alle Analysen beziehen sich auf die beschriebene Energiemenge exkl. Flugverkehr (vgl. Kapitel 5.3.2 Entwicklungspfad (exkl. Flugverkehr)).

Das Modell NEMO wurde am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz für die Berechnung von Emissionsausstoß und Energieverbrauch auf Verkehrsnetzwerken nach dem aktuellsten Stand der wissenschaftlichen Methoden entwickelt. NEMO verknüpft eine detaillierte Berechnung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte mit fahrzeugfeiner Verbrauchs- und Emissionssimulation. Das Modell vereint Flexibilität in den berechenbaren Zukunftsszenarien sowie benutzerfreundliche und effiziente Bedienung.

Für die vorliegenden Arbeiten wurde die Programmversion 5.0 zur Anwendung gebracht. Der Datenstand bezüglich Emissionsfaktoren der unterschiedlichen Emissionskomponenten von NEMO 5.0 ist für konventionelle Antriebstechnologien kompatibel zur aktuellen Version 4.1 des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA). Dies entspricht der aktuellsten und im August 2019 veröffentlichten HBEFA-Version. Darüber hinaus bildet NEMO noch einige im HBEFA derzeit nicht enthaltene Antriebskonzepte (Oberleitungsbusse; PHEV von LNF; Wasserstoffantriebe sowohl mit VKM als auch mit Brennstoffzelle etc.) ab (SCHWINGSHACKL 2019; DIPPOLD 2016; NOTTER et al. 2019).

5.4.2 Verkehrsleistung

Einen Eingangsparameter für die Verkehrsemissionsmodellierung stellt die erforderliche Reduktion der Gesamtverkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr dar. Entsprechende Analysen für alle Verkehrsträger und Verkehrsmittel erfolgten in Abstimmung mit der Entwicklung der Energiemengenverteilung gemäß Tabelle 9 und Tabelle 11 und aufbauend auf angenommenen spezifischen Jahresverkehrsleistungen.

Im diesem Forschungsprojekt zugrunde liegenden Datenrahmen wird diesbezüglich von einer Steigerung der Personenverkehrsleistung von 114 Milliarden Personenkilometern im Jahr 2018 (gemäß letztgültiger österreichischer Luftschadstoffinventur) um rund 7 % auf 122 Milliarden Personenkilometer im Jahr 2040 ausgegangen. Bei einem ähnlichen Bevölkerungswachstum im selben Zeitraum bedeutet dies, dass die jährliche Pro-Kopf-Verkehrsleistung im Jahr 2040 im Vergleich zum Status quo annähernd unverändert bleibt und die Österreicherin bzw. der Österreicher damit hinsichtlich des Mobilitätsausmaßes praktisch nicht eingeschränkt wird. Eine Verlagerung auf besonders energieeffiziente Verkehrsmittel ist dafür Voraussetzung.

Damit dieses Mobilitätsaufkommen im Personenverkehr vor dem Hintergrund der beschränkt verfügbaren erneuerbaren Energie und im Rahmen des gegenständlich ausgewiesenen Zielerreichungsszenarios gewährleistet werden kann, ist jedoch eine Reduktion des Güterverkehrsaufkommens erforderlich. Konkret wurde eine erforderliche Reduktion von 83 Milliarden Tonnenkilometern im Jahr 2018 um rund 3 % auf 81 Milliarden Tonnenkilometern im Jahr 2040 ermittelt. Hier leisten neben einer intensiven Verlagerung der Güterverkehrsströme auf die Schiene auch eine höhere Produktlebensdauer, eine gesteigerte Fahrzeugauslastung und der verstärkte Konsum von regionalen Produkten wesentliche Beiträge.

5.4.3 Energieeinsatz

Aufbauend auf den abgeschätzt verfügbaren erneuerbaren Endenergiemengen für den Verkehr im Ausmaß von rund 130 PJ (inkl. Flugverkehr) bzw. 109 PJ (exkl. Flugverkehr) und der oben beschriebenen möglichen Entwicklung der Gesamtverkehrsleistung wurden sowohl die Entwicklung des Energieeinsatzes als auch der CO₂-Emissionen im Verkehr als Zeitreihe bis 2040 modelliert. Die Ergebnisse werden nachfolgend erläutert.

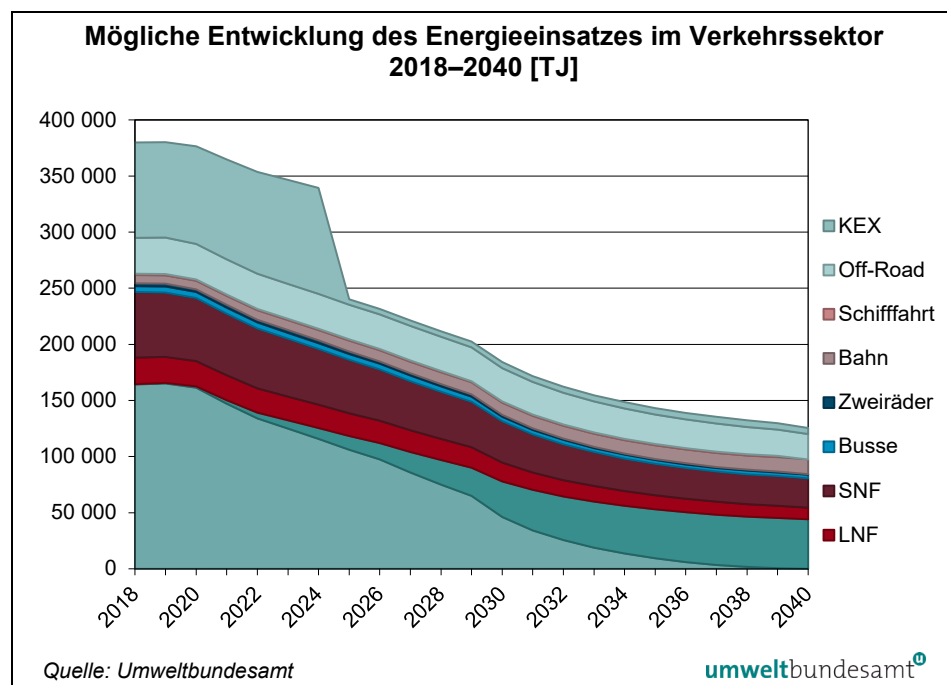
Wie Abbildung 23 entnommen werden kann, wurde im Jahr 2018 im Verkehrssektor eine Endenergiemenge von rund 380 PJ eingesetzt. Dabei handelt es sich fast ausschließlich um fossile Energie. Fast ein Viertel davon entfällt auf den fossilen Kraftstoffexport – also Kraftstoff, der in Österreich getankt, aber im Ausland verfahren wurde. Eine Angleichung der Kraftstoffpreise an das benachbarte Ausland führt im ausgewiesenen Szenario dazu, dass der Endenergieeinsatz bis 2025 um rund ein Drittel sinkt.

Der Off-Road-Bereich umfasst insbesondere Fahrzeuge und Geräte im land- und fortwirtschaftlichen Einsatz sowie im Baustelleneinsatz. Hier wird die Annahme zugrunde gelegt, dass bis 2040 kein Wachstum mehr verzeichnet wird und vorhandenes Gerät durch Elektrifizierung energieeffizienter betrieben wird. In allen anderen Fahrzeugkategorien reduziert sich der Energieeinsatz in Abhängigkeit der eingesetzten Technologien und Kraftstoffe in Anlehnung an Tabelle 9.

Auf diese Weise wurde eine Endenergieeinsatzmenge im Jahr 2040 von 126 PJ exkl. Flugverkehr errechnet. Dies bedeutet eine Differenz zum abgeschätzten Energieeinsatz von 109 PJ im Ausmaß von 17 PJ. Eine weitere Reduktion um diese Energiemenge kann beispielsweise durch folgende zwei Zusatzmaßnahmen gewährleistet werden:

- Bis zum Jahr 2040 werden nur mehr überdurchschnittlich energieeffiziente leichte Kraftfahrzeuge eingesetzt, deren durchschnittlicher Energieverbrauch 0,18 kWh/km im PKW bzw. 0,27 kWh/km im LNF nicht übersteigt.
- Die Aktivität im Off-Road-Bereich wird nicht nur konstant gehalten, sondern sogar um rund 10 % reduziert.

Abbildung 23:
Entwicklung
Endenergieeinsatz;
Darstellung:
Umweltbundesamt.



5.4.4 Kohlendioxid-Emissionen

Wie Abbildung 24 zeigt, kann die Erreichung der Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 auf der zugrunde liegenden Entwicklung der Gesamtverkehrsleistung und des Einsatzes einer Gesamtmenge erneuerbarer Energie im Ausmaß von 126 PJ bzw. 109 PJ exkl. Flugverkehr (vgl. Kapitel 5.5.3 Energieeinsatz) gewährleistet werden.

Die Abbildung zeigt eine exponentielle Abnahme der CO₂-Emissionen, die zum Großteil auf einer raschen Elektrifizierung des Landverkehrs basiert. Auch hier ist die Beseitigung des Kraftstoffports bis 2025 von besonderer Bedeutung.

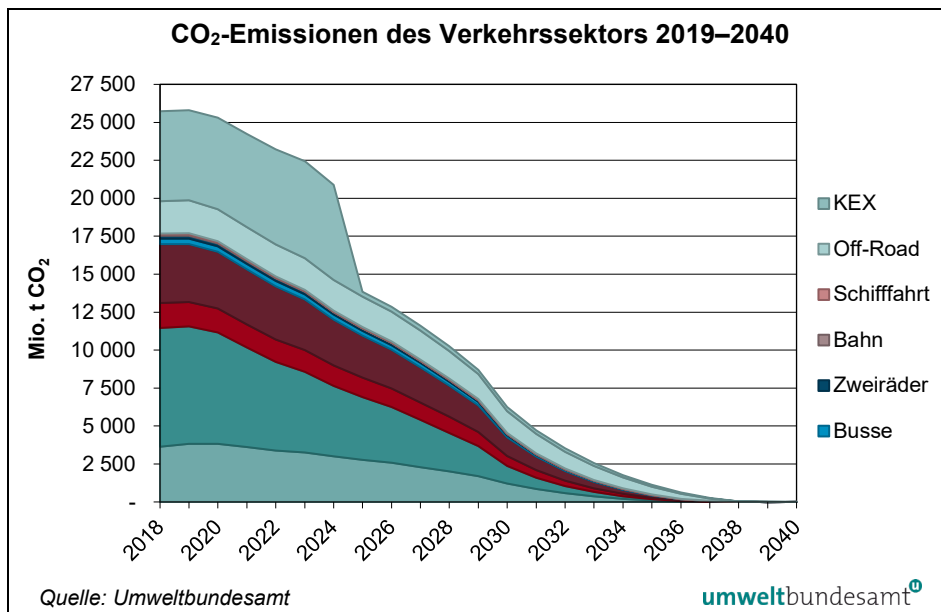


Abbildung 24:
Entwicklung CO₂-
Emissionen;
Darstellung:
Umweltbundesamt.

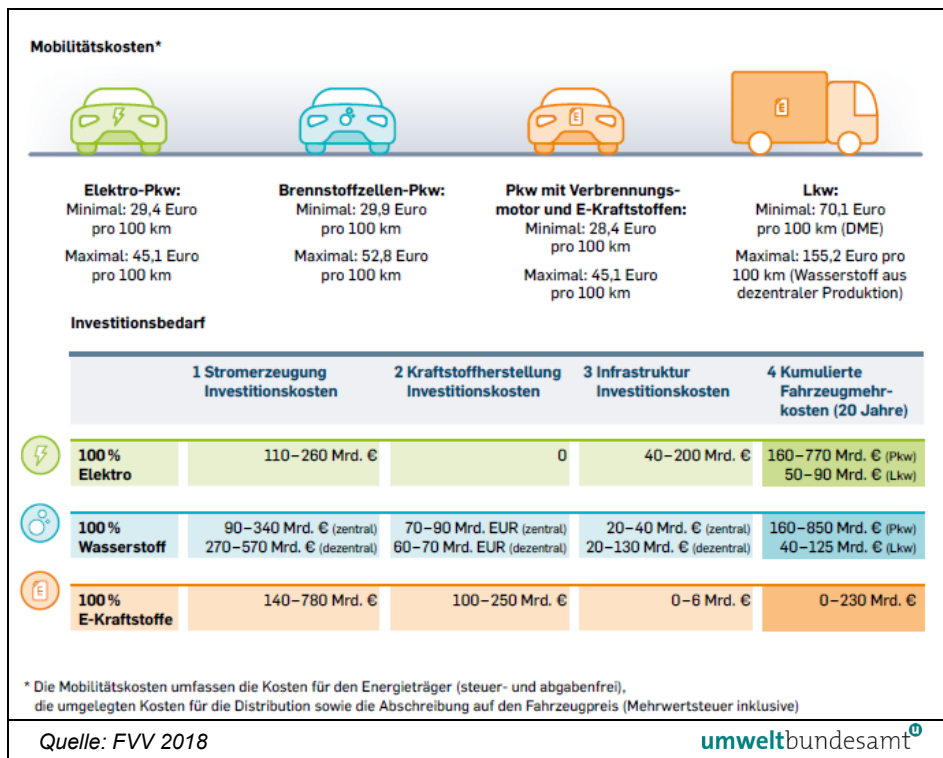
5.5 Preis- und Kostenstruktur

Eine im Jahr 2018 durchgeführte Studie des FVV (2018) zeigt unterschiedliche Energiepfade für den Straßenverkehr der Zukunft auf. Dabei werden folgende drei Szenarien für eine klimaneutrale Mobilität im Jahr 2050 veranschaulicht:

1. Szenario 100 % Elektro
2. Szenario 100 % Wasserstoff
3. Szenario 100 % E-Kraftstoffe

Die aus den drei Szenarien abgeleiteten Kosten sind in Abbildung 25 veranschaulicht.

Abbildung 25:
 Mobilitätskosten Studie
 FVV.



Aufgrund der limitierten Verfügbarkeit an erneuerbaren Energien ist insbesondere bei den strombasierten synthetischen Kraftstoffen (E-Kraftstoffe) aufgrund der hohen Energieverluste eine höhere Bepreisung anzudenken.

Kosten alternativer Antriebsformen und Kraftstoffe

Gesamt-Wirkungsgrad

Die Preisstrukturen für die Antriebsarten werden sich nach den künftigen Energiemengen richten. Energie wird in Zukunft teuer werden, daher ist ein viel sorgfältigerer und sparsamerer Umgang mit Energie vonnöten. Es kann angenommen werden, dass die Energiekosten umso höher sein werden, je schlechter der Gesamtwirkungsgrad einer Antriebsart ist.

- Am günstigsten werden strombasierte bzw. batterieelektrische Antriebe sein
- Wasserstoff wird um den Faktor 2 teurer sein. (Anmerkung: Wasserstoff mit Elektrolyse aus grünem Strom derzeit bei 6 EUR/kg (aus Erdgasreformierung 1,5 bis 2 EUR/kg); Reichweite von 100 km mit 1 kg Wasserstoff)
- Synthetischer Kraftstoff wird 4- bis 5-mal teurer sein.

Voraussetzung hierfür ist eine starke Besteuerung bzw. Bepreisung von fossilen Kraftstoffen, allen voran Benzin und Diesel, gefolgt von den etwas umweltfreundlicheren Kraftstoffen, zum Beispiel Erdgas, CNG, LNG.

Kosten Fahrzeuge

Derzeit sind batterieelektrische Fahrzeuge in der Anschaffung teurer als herkömmliche Verbrenner-Fahrzeuge. Bei der Betrachtung der Total Cost of Ownership, zu denen auch die Betriebskosten zählen, zeigt sich, dass diese bei batterieelektrischen Fahrzeugen bereits jetzt günstiger sind. Da das System Batterie

eine geringere Komplexität als das System Verbrennungskraftmaschine aufweist, ist davon auszugehen, dass auch die Herstellungs- und Anschaffungskosten sinken werden (VOGEL et al. 2019).

6 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE ANALYSE

Folgen für Wirtschaft und Gesellschaft

Die im Kapitel 5 beschriebenen Rahmenbedingungen und Maßnahmen zur Umsetzung des Entwicklungspfades zur Klimaneutralität im Verkehr ermöglichen eine qualitative Analyse seiner möglichen Auswirkungen auf die verschiedenen Akteure der österreichischen Volkswirtschaft (Haushalte, Unternehmen, Staat). Aufgrund der Bedeutung von Mobilität für wirtschaftliche und soziale Aktivitäten aller Art hat die Mobilitätswende weitreichende Folgen für Wirtschaft und Gesellschaft. Sie ist eine Phase intensiven technologischen Wandels, die mit großer Innovations- und Investitionsdynamik einhergeht und durch die Obsoleszenz nicht nachhaltiger Geschäftsfelder zu strukturellen Veränderungen in der Wirtschaft führt. Kurzfristig ist die nötige Transformation im Verkehr also durchaus mit Kosten verbunden. Gleichzeitig führen die hinterlegten Maßnahmen aber auch zu gesellschaftlichen Veränderungen (Werte, Lebensstile) und zur Etablierung neuer Geschäftsfelder, deren rechtzeitiges Erkennen und Nutzen zur langfristigen Stärkung des Wirtschaftsstandorts beiträgt. Innovations- und transformationsfähige Unternehmen sowie unterstützende politische Maßnahmen sind somit für den Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit ausschlaggebend.

6.1 Auswirkungen auf österreichische Unternehmen

Einige der in diesem Bericht angeführten Maßnahmen zur Umsetzung des erarbeiteten Entwicklungspfades betreffen Unternehmen bestimmter österreichischer Industrie- und Dienstleistungsbranchen **positiv, sowohl kurz- wie auch langfristig**:

- Der **Infrastrukturausbau** für den Fuß- und Radverkehr, den Bahnverkehr, den leitungsgebundenen Güterverkehr sowie für BEV (Ladestationen) wird über einen längeren Zeitraum beträchtliche Investitionen erfordern. Diese dürften primär der Baubranche zugutekommen, aber auch damit verbundene Branchen der Sachgütererzeugung (Baumaterialien, Metallerzeugnisse, elektrische Ausrüstungen) und Installationsdienstleistungen sollten profitieren. Die Bauwirtschaft erzeugt relativ viele heimische Arbeitsplätze, insbesondere im Vergleich zu manchen Branchen der Sachgütererzeugung, die stark in internationale Wertschöpfungsketten integriert sind und beispielsweise viele Komponenten importieren.
- Die **Leistungsausweitung des öffentlichen Verkehrs** durch Haltestellenverdichtung und Intervallreduktion stärkt Wertschöpfung und Beschäftigung im Fahrzeugbau (z. B. Bestellung neuer Garnituren) und in den Verkehrsdienstleistungen (Neueinstellungen von Personal im Zug- und Busverkehr). Während im Fahrzeugbau ein Gutteil der Wertschöpfung und Beschäftigung aufgrund des vergleichsweise hohen Importanteils im Ausland generiert wird, entsteht im öffentlichen Verkehr hauptsächlich heimische Beschäftigung. Durch die Verlagerung der Personenverkehrsleistung weg vom Individualverkehr hin zum öffentlichen Verkehr werden dort außerdem auch gänzlich neue Arbeitsplätze geschaffen.
- Die **Attraktivierung des Radverkehrs** schafft einen Impuls für Fahrradhersteller, -händler und -reparaturdienstleister.

Im Nationalen Energie- und Klimaplan Österreichs (BMNT 2019) ist für die Klimazielerreichung 2030 im Verkehr ein Investitionsbedarf von 97,2 Milliarden Euro ausgewiesen (Bundesanteil). Von Investitionen dieser Größenordnung sollten deutlich positive volkswirtschaftliche Effekte ausgehen.

Innerhalb der bestehenden Wirtschaftsstruktur und **somit kurzfristig negativ** wirken folgende dem Entwicklungspfad hinterlegte Maßnahmen auf österreichische Unternehmen:

- Durch **höhere Preise für fossile Kraftstoffe** (Kostenwahrheit im Verkehr, umgesetzt beispielsweise durch steuerliche Maßnahmen und Gebühren) steigen die Betriebskosten für fossil betriebene Fahrzeuge in Unternehmen aller Branchen¹. Bei in etwa gleichbleibender Fahrleistung – kurzfristig bestehen oft wenige Alternativen zum Auto – steigen folglich die Produktionskosten, was die Wettbewerbsposition der Unternehmen schwächt. Ebenso sinken ihre für Investitionen verfügbaren Mittel, was die gesamtwirtschaftliche Nachfrage reduziert und einen Rückgang von Wertschöpfung und Beschäftigung zur Folge hat. Gleichzeitig regt die Maßnahme – gemeinsam mit einer relativen Vergünstigung von Strom – eine Nachfrageverlagerung hin zu alternativ betriebenen Fahrzeugen an, was einerseits die Wettbewerbsposition der traditionellen Autoindustrie schwächt, andererseits aber Anbieter alternativ betriebener Fahrzeuge stärkt und den Strukturwandel in Wirtschaft und Mobilität unterstützt.
- Die **Neuzulassungsverbote von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen im Personen- und Güterverkehr** bedeuten ein Auslaufen der herkömmlichen Geschäftsmodelle europäischer Automobilunternehmen und ihrer Zulieferer, die nach wie vor stark auf Autos mit Verbrennungsantrieb spezialisiert sind. In Österreich trug die Automobilwirtschaft (inklusive vor- und nachgelagerter Branchen) im Jahr 2018 insgesamt 7,6 % zur Wertschöpfung und 7 % zur Beschäftigung bei (COUNCIL4 2019). Begleitend zum Nachfragerückgang nach Verbrennern, der sich in Hinblick auf Zulassungsverbote einstellen wird, ist daher kurzfristig mit negativen Folgewirkungen für die österreichische Volkswirtschaft zu rechnen. Diese können jedoch durch politische Maßnahmen, die den Strukturwandel unterstützen, abgemildert werden (siehe unten).
- Ähnlich wirken die **Erhöhung von Flugpreisen** und das **Ausschleifen des nationalen Linienflugverkehrs in Österreich**, die einen Teil des derzeitigen Geschäfts von Fluglinien eliminieren. Einerseits entfallen Kurzstreckenflüge, die auf den Schienenfernverkehr verlagert werden sollen. Andererseits senken höhere Preise die Nachfrage nach Flugdienstleistungen durch Privat- und Firmenkunden, da Dienstreisen relativ leicht durch Telekonferenzen ersetzbar sind und Urlaubsreisende auf (teilweise noch zu bauende) Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken ausweichen können. Resultierende sinkende Umsätze schwächen die internationale Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Fluglinien, was auch ihren Beitrag zur heimischen Wertschöpfung und Beschäftigung reduziert.

¹ Die Einführung von lenkenden Gebühren (Park- oder Staugebühren) und die Ökologisierung der LKW-Maut (Umsetzung Mauttarifverordnung 2017 und Spreizung der LKW-Mauttarife nach EURO-Klassen) haben ähnliche Auswirkungen.

Diesen negativen Effekten wirken **längerfristig** folgende Maßnahmen entgegen, die den **Strukturwandel unterstützen und die Etablierung neuer Industriezweige, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle fördern**:

- Die **Förderung von Elektromobilität und sonstigen alternativen Antrieben** im Individualverkehr, bei Bussen, Klein-LKW und schweren Nutzfahrzeugen bietet einen Anreiz für den Umstieg auf alternativ betriebene Fahrzeuge und beschleunigt dadurch ihre Marktdurchdringung. Dies steigert die Nachfrage nach alternativ betriebenen Fahrzeugen und vergrößert somit ihren potenziellen Markt, was wiederum einen Anreiz für Unternehmen der Automobil(zuliefer)-Branche schafft, in die Entwicklung relevanter Technologien zu investieren. Dadurch kann Österreichs Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit in den Schlüsseltechnologien der Mobilitätswende gestärkt werden. Neue Geschäftsfelder entwickeln sich im Fahrwasser dieser neuen Technologien (z. B. Anbieter von E-Tank-Angeboten, also eigenen Tarifmodellen zum Stromtanken und entsprechenden Smartphone-Apps).
- Zusätzlich sollten bereits bestehende **Forschungs- und Entwicklungsprogramme im Bereich alternativer Antriebe** ausgebaut werden, sodass die Hersteller während der Phase des Übergangs zu alternativen Antrieben auch direkt unterstützt werden². Die Produkte der hochspezialisierten österreichischen Zulieferunternehmen sind in den Bereichen Fahrzeugkarosserie und Fahrzeugantrieb zum Teil mit alternativen Antrieben kompatibel, allerdings besteht Aufholbedarf in der Batteriezellfertigung, die derzeit noch großteils in Asien erfolgt. Sie trägt maßgeblich zur Wertschöpfung in der Elektroautoproduktion bei und hilft, die Beschäftigungsverluste im Vergleich zur Produktion von Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieb auszugleichen (BCG 2020). Gelingt es den Unternehmen der österreichischen Automobilbranche, sich innovative neue Marktnischen aufzubauen, können langfristig Wertschöpfung und Beschäftigung der Branche im Land gehalten oder ausgebaut werden.
- Die **Förderung des Umweltverbunds im Stadt-Umland-Bereich** und die **Reduktion der ÖV-Ticketpreise** bieten einen preislichen Anreiz zum Umstieg vom Individualverkehr auf den öffentlichen Verkehr. Der weiter oben behandelte Ausbau des öffentlichen Verkehrs (Angebotsausweitung, Ausbau der Schieneninfrastruktur) bietet die Voraussetzung dafür, dass der ÖV auch verstärkt angenommen werden kann. Die positiven Effekte auf Wertschöpfung und Beschäftigung, die dadurch generiert werden, wirken den Verlusten in anderen Branchen entgegen und erleichtern den Strukturwandel in Wirtschaft und Mobilität. Neue Geschäftsmodelle und Mobilitätsformen entwickeln sich komplementär zum öffentlichen Verkehr, so zum Beispiel Mobility-as-a-Service (MaaS), Ride-Sharing oder der Mikro-ÖV.

² Vgl. den von der deutschen Bundesregierung im November 2020 beschlossenen „Zukunftsfonds Automobilindustrie“, der die Transformation der Branche langfristig unterstützen soll (BPA, 2020).

6.2 Auswirkungen auf österreichische Haushalte

Für die österreichischen Haushalte wirken sich folgende Maßnahmen zur Umsetzung des erarbeiteten Entwicklungspfades im Verkehr **kurzfristig negativ** aus:

- Durch **höhere Preise für fossile Kraftstoffe** (Kostenwahrheit im Verkehr, umgesetzt beispielsweise durch steuerliche Maßnahmen und Gebühren) steigen bei in etwa gleichbleibender Fahrleistung die Konsumausgaben der Haushalte für den Verkehr, da diese kurzfristig oft wenige Alternativen zum PKW haben. Dadurch bleibt *ceteris paribus* weniger vom verfügbaren Haushaltseinkommen für die restlichen Konsumausgaben übrig, wodurch die gesamtwirtschaftliche Nachfrage reduziert wird und Wertschöpfung und Beschäftigung sinken. Gleichzeitig trägt die Maßnahme – zusammen mit einer relativen Vergünstigung von Strom – zu einer Preiskonvergenz im Betrieb fossiler und alternativ betriebener Fahrzeuge bei, was den Umstieg der Haushalte auf letztere begünstigt. Längerfristig ergibt sich daher eine Verlagerung der Konsumausgaben im Verkehr von fossilen Treibstoffen zu günstigeren Alternativen wie Strom.
- **Höhere Preise für Flugtickets** wirken ähnlich wie höhere fossile Kraftstoffpreise, beeinträchtigen das verfügbare Haushaltseinkommen aber nicht so stark, da Ausweichmöglichkeiten wie die Bahn bestehen bzw. Urlaubsreisen verschoben oder nicht in Anspruch genommen werden können (höhere Preiselastizität der Nachfrage im Luftverkehr als im Individualverkehr; vgl. PUWEIN 2009). Auch diese Maßnahme stellt einen Anreiz zum Umstieg auf alternative Verkehrsmittel vonseiten der Haushalte dar, insbesondere für Urlaubsreisen.
- Die **Neuzulassungsverbote von Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen im Personenverkehr** haben dann negative Auswirkungen auf die verfügbaren Einkommen der Haushalte, wenn sie zu einem Zeitpunkt eingeführt werden, zu dem die Anschaffungskosten von alternativ betriebenen Fahrzeugen noch über jenen von Verbrennern liegen. Eine vorausschauende, rechtzeitige Kommunikation solcher Verbote kann insofern mildernd wirken, als dass sie kostensenkende technische Innovationen anregt. Auch eine Abstimmung mit betroffenen Gruppen kann für die Akzeptanz der Maßnahme förderlich wirken.

Kurz- und langfristig positiv wirken folgende Maßnahmen für die österreichischen Haushalte:

- Die **Förderung von Elektromobilität und sonstigen alternativen Antrieben** im Individualverkehr reduziert die Anschaffungskosten für Fahrzeuge mit alternativem Antrieb, die derzeit zum Teil noch deutlich teurer sind als Verbrenner. Insbesondere in Hinblick auf Neuzulassungsverbote von Verbrennern verhindert die Förderung Einschnitte im verfügbaren Haushaltseinkommen. Wo Verbrenner und alternativ betriebene Fahrzeuge preislich nahe beieinanderliegen, bietet die Förderung einen deutlichen Anreiz für den Umstieg.
- Die **Reduktion der ÖV-Ticketpreise** senkt bei in etwa gleichbleibender Inanspruchnahme des öffentlichen Verkehrs die Ausgaben der Haushalte für Verkehrsleistungen und steigert so das verfügbare Haushaltseinkommen, das anderweitig ausgegeben werden kann. Dadurch entsteht ein Impuls für die österreichische Wirtschaft, umso mehr da die Maßnahme besonders Beziehern niedriger Einkommen zugutekommt, die eher auf öffentliche Verkehrsmittel angewiesen sind und zusätzliches Einkommen auch eher wieder ausgeben als

Bezieher höherer Einkommen. Auch vom **Ausbau von Angebot und Infrastruktur im öffentlichen Verkehr** profitiert diese Einkommensgruppe stark.

6.3 Auswirkungen auf den österreichischen Staat

Für den österreichischen Staat ergeben sich **kurzfristig positive und negative** Effekte aus den Maßnahmen zum Entwicklungspfad im Verkehr:

- **Deutliche Mehrausgaben für den Staat** ergeben sich aus dem Infrastrukturausbau für den Fuß- und Radverkehr, den Bahnverkehr, den leitungsgebundenen Güterverkehr sowie für BEV, ebenso wie durch die Angebotsausweitung im öffentlichen Verkehr, Förderungen für Elektromobilität und sonstige alternativen Antriebe und die Reduktion der ÖV-Ticketpreise. Teilweise werden diese Ausgaben durch die positiven Impulse für die Wirtschaft, die sie auslösen, wieder kompensiert (siehe Kapitel 6.1).
- **Mehreinnahmen für den Staat** ergeben sich durch jene Preiserhöhungen für fossile Kraftstoffe, die durch Steuern und Gebühren herbeigeführt werden.

Auch **längerfristig** gibt es **positive und negative** Auswirkungen für den Staat:

- **Deutliche Minderausgaben** resultieren aus der sinkenden Notwendigkeit, fossile Energieträger zu importieren, wenn die Mobilitätswende weg vom fossil betriebenen motorisierten Individualverkehr gelingt. Im Jahr 2019 beliefen sich die Ausgaben Österreichs für Energieimporte netto (abzüglich Einnahmen aus Energieexporten) auf 8,7 Milliarden Euro (STATISTIK AUSTRIA 2020). Diese Summe kann anderweitig ausgegeben werden, beispielsweise für die erwähnten Infrastrukturinvestitionen oder um Unternehmen und Haushalte für die gestiegenen Kraftstoffpreise zu kompensieren.
- **Mindereinnahmen bzw. sinkende Mehreinnahmen** ergeben sich langfristig aus dem Rückgang des Anteils an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, der die Bemessungsgrundlage für beispielsweise die Mineralölsteuer reduziert. Die **Einführung und schrittweise Erhöhung einer fahrleistungsabhängigen PKW-Maut** wirkt diesem Einnahmenentgang jedoch entgegen.
- Durch die Reduktion der Emissionen von Treibhausgasen und anderen Luftschadstoffen entlang des Entwicklungspfades (vgl. Kapitel 5.4) kommt es auch zu einer Reduktion der sogenannten externen Kosten des Verkehrs, was sich in **Minderausgaben für die Behebung von verkehrsbedingten Klima-, Umwelt- und gesundheitlichen Schäden** niederschlägt (vgl. Kapitel 11 in BMVIT 2011).

7 AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Der Klimaschutz ist alternativlos und erfordert im Verkehrssektor eine entsprechende Flottenmodernisierung und Flottenumrüstung in Richtung emissionsfreier bzw. emissionsneutraler Fahrzeuge. Hier können unterschiedliche Instrumente zum Einsatz kommen (z. B. Zulassungsverbot für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren). Dies kann aus heutiger Sicht zum Teil noch schwer vorstellbar sein, wird jedoch aufgrund des steigenden Leidensdrucks (ökologische und daraus resultierende ökonomische Auswirkungen) künftig erfolgen müssen.

Bei Energiefragen ist die im Entwicklungspfad vorgenommene Well-to-Wheel-Betrachtung jedoch nicht ganz ausreichend. Die Energiemenge für die Produktion und die Langlebigkeit von Gütern sowie die Thematik der Kreislaufwirtschaft sollen im Zuge von Life-Cycle-Assessments künftig mitberücksichtigt werden.

Für die Klimaneutralität soll erneuerbare Energie bei der Produktion von Strom, Fahrzeug und Fahrbatterie eingesetzt werden. Auf diese Weise kann man den tatsächlichen Beitrag von BEV zur Erreichung nationaler und internationaler Klimaziele beurteilen. Aus bisherigen Studien ist abzuleiten, dass BEV gegenüber Benzin- und Diesel-Fahrzeugen deutliche Emissionsvorteile haben, dies muss aber in einem höheren Detaillierungsgrad erläutert werden. Des Weiteren ist insbesondere bei der Elektromobilität die Thematik der Gleichzeitigkeit bzw. der Möglichkeit des gleichzeitigen Beladens zu untersuchen.

Im Sinne einer gesamtheitlichen Betrachtung erfolgt aber auch die Anwendung von raum- und ortsplanerischen Instrumenten, um regionale Strukturen bzw. regionale Zentren zu stärken, die Wirtschaftskraft zu erhöhen und den Modal Split bzw. die Verkehrsleistung nachhaltig zu verbessern.

Weiter Forschungsbedarf liegt insbesondere bei neuartigen Mobilitätsformen bzw. Mobilitätsstilen. Welchen Beitrag leistet MaaS (Mobility-as-a-Service) in der Personenmobilität? Wie hoch ist das CO₂-Einsparungspotenzial? Kann dadurch ein Beitrag zur Auslastungssteigerung und Reduzierung der erforderlichen Fahrleistung erreicht werden?

Im Bereich des Güterverkehrs ist eine Steigerung der Fahrzeugauslastung durch die Konsolidierung von Warenströmen und durch den Einsatz neuartiger Konzepte wie zum Beispiel Physical-Internet oder Synchromodalität gegeben.

Den limitierenden Faktor stellen beim Einsatz von alternativen Antriebsformen aus erneuerbaren Energien unter anderem die vorhandenen Energiemengen dar. Daher sollten die maximalen Ausbaupotenziale in Österreich (z. B. PV-Flächen) ausgeschöpft werden und es empfiehlt sich über mögliche höhere und kostengünstigere Stromimporte nachzudenken. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Speicherung von Energie bzw. die Erweiterung von Speicherkapazität (Stichwort Wasserstoff).

Seitens der Politik gilt es hingegen klar Stellung zu beziehen und eine einheitliche Richtung vorzugeben. Durch entsprechende nationale und internationale Regularien wird es der Industrie und den OEM ermöglicht, die Technologieentwicklung anzuregen und entsprechende Produkte bereitzustellen. Auf diese Weise können im globalen Kontext neben der Erreichung der Klimaziele langfristig (Wettbewerbs-)Vorteile für die europäische Industrie und Wirtschaft generiert werden.

***künftige
Lebenszyklus-
analysen***

Erneuerbare Energie

***neuartige
Mobilitätsformen***

***verfügbare
Energiemengen***

***nationale und
internationale
Regularien***

8 VERZEICHNIS

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: THG-Emissionen des Verkehrssektors 1990–2018.....	9
Abbildung 2: Entwicklung der THG-Emissionen mit bestehenden Maßnahmen	10
Abbildung 3: Projektzielsetzung	11
Abbildung 4: Projektlaufzeit.....	11
Abbildung 5: Projektstruktur	12
Abbildung 6: Methodische Herangehensweise.....	13
Abbildung 7: Alternative Antriebsformen aus erneuerbaren Energien	14
Abbildung 8: Strombedarf aus Erneuerbaren Energien für verschiedene Antriebs- und Kraftstoffkombinationen (pro 100 km).....	15
Abbildung 9: THG-Emissionen bezogen auf den Energieverbrauch 2020 (Well-to-Wheel).....	16
Abbildung 10: Einsatz alternativer Antriebsformen im Verkehrssektor.....	16
Abbildung 11: Annahmen Neuzulassungen bei Verkehrsmitteln und THG-Entwicklung.....	17
Abbildung 12: Energieketten zur Herstellung alternativer Antriebsformen aus erneuerbaren Energien	18
Abbildung 13: Überblick Electric Road Systems.....	19
Abbildung 14: Durchschnittliche Reichweite je Antriebskonzept mit einer Kilowattstunde direkt eingesetzter Energie.....	21
Abbildung 15: Power-to-X Herstellungspfade	25
Abbildung 16: Überblick Antriebsformen und Kraftstoffe im straßengebundenen Verkehr	31
Abbildung 17: Gesamte THG-Emissionen in g CO ₂ -eq pro Fahrzeugkilometer verschiedener PKW-Antriebsarten	31
Abbildung 18: Nutzung erneuerbarer Energien 2016, Ziele bis 2030 und publizierte Potenziale bis 2050.....	35
Abbildung 19: Energieberechnung Vorgehensweise	36
Abbildung 20: Einsatz fossiler Kraftstoffe im Verkehr Klimaneutralität 2050 [TJ]	39
Abbildung 21: Einsatz alternativer Antriebe im Verkehr Klimaneutralität 2050 [TJ]	39
Abbildung 22: THG-Emissionen.....	43
Abbildung 23: Entwicklung Endenergieeinsatz.....	46
Abbildung 24: Entwicklung CO ₂ -Emissionen	47
Abbildung 25: Mobilitätskosten Studie FVV	48

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile Electric Road Systems	19
Tabelle 2: Kurzbeschreibung Biogas	27
Tabelle 3: Kurzbeschreibung Biodiesel	28
Tabelle 4: Kurzbeschreibung Bio-ETBE und Bioethanol	28
Tabelle 5: Kurzbeschreibung Pflanzenöl	29
Tabelle 6: Kurzbeschreibung Hydriertes Pflanzenöl.....	29
Tabelle 7: Kurzbeschreibung synthetischer Kraftstoff aus Biomasse	29
Tabelle 8: potenzielle Use-Cases von alternativen Antriebsformen und Kraftstoffen.....	34
Tabelle 9: Entwicklungspfad Klimaneutralität 2050 [TJ]	38
Tabelle 10: Energiemengengerüst Klimaneutralität 2050 [TJ].....	40
Tabelle 11: Entwicklungspfad Klimaneutralität 2050 exkl. Flugverkehr 2050 [TJ]	41
Tabelle 12: Energiemengengerüst Klimaneutralität 2050 exkl. Flugverkehr 2050 [TJ]	42
Tabelle 13: Vergleich Energiemengen 2050 inkl. und exkl. Flugverkehr 2050 [TJ]	43

8.3 Quellen und Literaturverzeichnis

AGORA VERKEHRSWENDE (2017): Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende. S. 52f, S. 60.

BCG – Boston Consulting Group (2020): Shifting Gears in Auto Manufacturing. <https://web-assets.bcg.com/fd/de/20c24ec2407d9622175e45e84a2c/bcg-shifting-gears-in-auto-manufacturing-sep-2020.pdf>

BEÖ – Bundesverband Elektromobilität Österreich (2019): 5 Punkte für Elektromobilität. 5 Punkte des Bundesverband Elektromobilität Österreich (BEÖ) zum Ausbau der E-Mobilität unter Verwendung von erneuerbaren Energiequellen in Österreich. Für eine nachhaltige und leistbare Versorgung mit Elektromobilität. Oktober 2019.

BMNT – Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019): Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Dezember 2019.

BMVIT – Bundesministerium für Verkehr, Infrastruktur und Technologie und Herry Verkehrsplanung Consulting (2011): Verkehr in Zahlen, Ausgabe 2011. Wien.

- BPA – Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (BPA) (2020): 4. Spitzengespräch der Konzentrierten Aktion Mobilität – „Transformation unterstützen, Wertschöpfungsketten stärken“. Pressemitteilung 410. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/pressemitteilungen/4-spitzengespraech-der-konzentrierten-aktion-mobilitaet-transformation-unterstuetzen-wertschoepfungsketten-staerken--1815818>.
- COUNCIL4 GmbH in Kooperation mit Dr. Hans-Peter Kleebinder (2019): Auf der Siegerstraße bleiben. Automotive Cluster der Zukunft bauen, Szenarien und Analyse im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) und der Vereinigung der österreichischen Industrie (IV).
- DIPPOLD, M. (2016): Entwicklung eines Simulationsmodells zur Ermittlung von Energieverbrauch und Emissionen auf Verkehrsnetzwerken. Dissertation. Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik. Technische Universität, Graz.
- EFLOG (2014): Neue Fahrzeugtechnologien und ihre Effekte auf Logistik und Güterverkehr. Servicability of Low-Emission-Vehicle-Technologies to co-optimize Future Logistics and Freight Transport (EFLOG). S. 41.
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR SYSTEM - UND INNOVATIONSFORSCHUNG (2015): Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030.
- FRITZ, D.; HEINFELLNER, H.; LICHTBLAU, G.; PÖLZ, W. & SCHODL, B. (2016): Ökobilanz alternativer Antriebe. Fokus Elektrofahrzeuge. Umweltbundesamt, Wien.
- FRITZ, D.; HEINFELLNER, H.; LICHTBLAU, G.; PÖLZ, W. & STRANNER, G. (2018): Update: Ökobilanz alternativer Antriebe. Umweltbundesamt, Wien. S. 8.
- FvV (2018): Energiepfade für den Straßenverkehr der Zukunft. Optionen für eine klimaneutrale Mobilität im Jahr 2050. S. 17.
- GUSTAVSSON, M.; HACKER, F. & HELMS, H. (2019): Overview of ERS concepts and complementary technologies. Swedisch-German research collaboration on Electric Road Systems. S. 8.
- GUSTAVSSON, M.; LINDGREN, M.; HELMS, H. & MOTTSCHALL, M. (2020): Real-world experiences of ERS: Best practices from demonstration projects in Sweden and Germany. Swedish-German research collaboration on Electric Road Systems.
- HEINFELLNER, H. & FRITZ, D. (2019): Zur Ökobilanzierung von E-Autos und was die VerbraucherInnen darüber erfahren. Eine Marktanalyse. In: KAMMER FÜR ARBEITER UND ANGESTELLTE FÜR WIEN: Information zur Umweltpolitik. S. 8.
- HYDROGEN COUNCIL (2017): How hydrogen empowers the energy transition. S. 8.
- KERDONCUFF, P. (2008): Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation. Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Wirtschaftswissenschaften. Universitätsverlag Karlsruhe. S. 10f, S. 12.
- KRUTZLER, T.; ZECHMEISTER, A.; STRANNER, G.; WIESENBERGER, H.; GALLAUNER, T.; GÖSSL, M.; HELLER, C.; HEINFELLNER, H.; IBESICH, N.; LICHTBLAU, G.; SCHIEDER, J.; SCHNEIDER, J.; SCHINDLER, I.; STORCH, A. & WINTER, R. (2017): Energie- und Treibhausgasszenario im Hinblick auf 2030 und 2050. Synthesebericht 2017. Umweltbundesamt, Wien.
- NOTTER, B. et al. (2019): HBEFA 4.1 Development Report. INFRAS, Bern, Heidelberg.

- OLSSON, O. (2014): Slide-in Electric Road System, Conductive project report, Phase 1. Presented October 25, 2013.
- ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND (2019): Bioenergie Atlas Österreich 2019. S. 15.
- PICHLMAIER, S.; HÜBNER, T. & KIGLE, S. (2019): Welche strombasierten Kraftstoffe sind im zukünftigen Energiesystem relevant? Forschungsstelle für Energiewirtschaft. <https://www.ffe.de/publikationen/veroeffentlichungen/863-welche-strombasierten-kraftstoffe-sind-im-zukuenftigen-energiesystem-relevant>.
- PÖLZ, W. & SALCHENEGGER, S. (2005): Biogas im Verkehrssektor. Technische Möglichkeiten, Potential und Klimarelevanz. Umweltbundesamt, Wien. S. 22ff.
- PUWEIN, W. (2009): Preise und Preiselastizitäten im Verkehr. WIFO Monatsberichte 10/2009. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien. S. 779-798.
- REIF, K. et al. (2010): Konventioneller Antriebsstand und Hybridantriebe mit Brennstoffzellen und alternativen Kraftstoffen. Hrsg. Robert Bosch GmbH. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Vieweg + Teubner Verlag. S. 84ff.
- RUDOLPH, F. (2019): Der Beitrag von synthetischen Kraftstoffen zur Verkehrswende: Optionen und Prioritäten. Kurzstudie im Auftrag von Greenpeace Deutschland. Wuppertal Institut. S. 4.
- SCHERR, M. (2016): Kraftstoffe für Dieselmotoren im Vergleich. <https://www.landwirt.com/Kraftstoffe-fuer-Dieselmotoren-im-Vergleich..17234..Bericht.html>
- SCHWINGSHACKL, M. & REXEIS, M.: Straßenverkehrsemissionen und Emissionen sonstiger mobiler Quellen Österreichs für die Jahre 1990 bis 2018 (OLI2019). Erstellt im Auftrag der Umweltbundesamt GmbH. Bericht Nr. I-19/19/Schwings EM I-19/07/679 vom 12.12.2019
- SPIEGEL ONLINE (2012): Beliebter Diesel: Die wichtigsten Fragen zum Selbstzündersprit – und die Antworten. <https://www.spiegel.de/fotostrecke/herstellung-steuer-verbrauch-die-unterschiede-diesel-und-benzin-fotostrecke-81219-6.html>
- STATISTIK AUSTRIA (2020): Endgültige Außenhandelsdaten 2019. Pressemitteilung 12.265-105/20, Wien. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/aussenhandel/hauptdaten/123763.html
- TRANSPORT & ENVIRONMENT (2018): How to decarbonise European transport by 2050. S. 13f.
- VCÖ (2020): Grünen Wasserstoff sinnvoll im Verkehr einsetzen. VCÖ factsheet, Verkehr aktuell 2020-02. S. 2.
- VERBUND (2014): Speicher der Zukunft - Power to Gas. <https://www.verbund.com/de-at/blog/blog-artikel/2014/10/06/power-to-gas>
- VOGEL, J. & GEIGER, K. (2019): Business4Climate - Unternehmensstrategien im Einklang mit Klimaschutz und Klimawandelanpassung. Endbericht von StartClim2018.D. In StartClim2018: Weitere Beiträge zur Umsetzung der österreichischen Anpassungsstrategie. Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, ÖBf, Land Oberösterreich.

- WIETSCHEL, M.; GNANN, T.; KÜHN, A.; PLÖTZ, P.; MOLL, C.; SPETH, D.; BUCH, J.; BOBMAN, T.; STÜTZ, S.; SCHELLERT, M.; RÜDIGER, D.; BALZ, W.; FRIK, H.; WAISMUTH, V.; PAUFLER-MANN, D.; RÖDL, A.; SCHADE, W. & MADER, S. (2017):
Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-LKW.
Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe. S. 8.
- WIND, G. & PILLES, H. (2012): Grundlagen – Biomasseverflüssigung. Status der Biomasseverflüssigung im Hinblick auf Anwendungen in ländlichen Gebieten. S. 22.

9 ANHANG

Interview mit Expertinnen und Experten

Experte/Expertin	Organisation, Zuständigkeit
Thomas Gallauner	Umweltbundesamt, Industrie & Energieaufbringung
Hermann Hofbauer	Technische Universität Wien, Zukunftsfähige Energietechnik
Franz Kirchmayr	Kompost&Biogas Verband Österreich
Gerhard Krachler	Magna Steyr
Florian Maringer	Verband Erneuerbare Energien
Christian Pesau	Industriellenvereinigung, Arbeitskreis der Automobilimporteure
Christoph Pfmeter	Österreichischer Biomasse-Verband
Peter Prenninger	AVL
Michael Sattler	OMV
Ute Teufelberger	Bundesverband Elektromobilität
Alexander Trattner	HyCentA Research GmbH