



Universität für Bodenkultur Wien

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Energieeffizienz und CO₂-Bilanz konventioneller und alternativer Antriebstechnologien

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Umwelt und Bioressourcenmanagement

eingereicht von

Andreas Brait

Matr. Nr.: 01241672

Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

Institut für Verfahrens- und Energietechnik

Betreuer:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Tobias Pröll

Dipl.-Ing. Dr. Iris Kral

Dipl.-Ing. Dr. David Wöß

Wien, Juli, 2020



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuallererst möchte ich meinen Eltern von ganzem Herzen ein großes Dankeschön aussprechen. Durch ihre Unterstützung haben sie mir nicht nur dieses Studium ermöglicht, sondern mir auch den Weg bis dahin geebnet. Sie sind mir immer zur Seite gestanden und haben mir immer ein offenes Ohr geschenkt. In jeder Situation meines Lebens haben sie mir Rückhalt gegeben und mich ermutigt, meine Ziele zu verfolgen. Ich bin froh solche Eltern wie euch beiden zu haben!

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Schwester Angelika. Bedanken möchte ich mich bei ihr für die zahlreichen interessanten Debatten und Ideen, sowie für ihre Beiträge und Antworten auf meine Fragen, die mich beim Schreiben dieser Arbeit unterstützt haben. Auch finde ich bei ihr immer einen wichtigen Rückhalt, den ich sehr schätze.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Freundin Melanie, die mir ebenfalls mit viel Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite gestanden ist. Für ein immer offenes Ohr, motivierende und ermutigende Worte, sowie gute Ideen und Unterstützung in allen Situationen gehört ihr ebenfalls ein großes Dankeschön ausgesprochen.

Ein großer Dank gebührt natürlich auch meinen Betreuern Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Tobias Pröll, Dipl.-Ing. Dr. Iris Kral und Dipl.-Ing. Dr. David Wöß, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet haben. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken. Ich konnte dabei sehr viel lernen und es war eine besondere Erfahrung für mich!

Andreas Brait

Wien, 17.07.2020

Kurzfassung

Welche Antriebstechnologie in Zukunft die Straßen dominieren wird, hängt davon ab, wie umweltfreundlich diese im Vergleich zu den anderen Antriebssystemen ist. Die vorliegende Masterarbeit gibt einen Überblick über die Energieeffizienz und die CO₂-Bilanz von Diesel-, Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen. Um die emittierten CO₂-Emissionen der Fahrzeuge zu berechnen, sind die Bereiche der Rohstoffbereitstellung, Fahrzeugproduktion, Treibstoffherstellung und Fahrbetrieb herangezogen worden. Damit die Umweltfreundlichkeit der Antriebstechnologien genauer aufgezeigt werden kann, ist im Weiteren ein Vergleich dieser Antriebssysteme in drei europäischen Ländern (Österreich, Polen und Italien) vorgenommen worden.

Bezogen auf das Argument der Dekarbonisierung und Elektrifizierung des Verkehrssektors sind neben dem derzeitigen üblichen Treibstoffgewinnungsverfahren für Diesel- und Brennstoffzellenfahrzeugen auch Wasserstoff aus Elektrolyse und synthetischer Dieselkraftstoff in Betracht gezogen worden. Es zeigt sich grundsätzlich, dass Fahrzeuge, deren Treibstoff aus Strom gewonnen wird, in Ländern mit einem CO₂-armen Strom-Mix eine geringere Emissionsmenge pro Kilometer emittieren als in Ländern mit einem CO₂-reichen Strom-Mix. Danach entscheidet sich auch, ob Fahrzeuge, deren Kraftstoff auf fossiler Basis besteht, als umweltfreundlich gelten oder nicht.

Neben dem CO₂-Fußabdruck eines Strom-Mix ist im Weiteren auch die Herstellung der Fahrzeuge ein relevanter Umweltfaktor. Aufgrund des Akkumulators in einem batteriebetriebenen Fahrzeug (BEV) sowie der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks in einem Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) verursachen diese Antriebstechnologien deutlich mehr CO₂-Emissionen bei der Produktion als ein Dieselfahrzeug. Um diese Fahrzeugtechnologie als umweltfreundlichste Variante zu bezeichnen, muss, aufbauend auf den länderspezifischen Strom-Mix, eine bestimmte Fahrleistung geleistet werden, wodurch deren CO₂-Rucksack aus der Herstellung reduziert werden kann. Wird ein Fahrzeug jedoch nur wenig genutzt und erreicht das kalendarische Ende deutlich unter einer Fahrleistung von 100.000 km ist das konventionell betriebene Dieselfahrzeug die bessere umweltrelevante Alternative.

Schlagwörter: Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug; Brennstoffzellenfahrzeug; Konventionelles Fahrzeug; CO₂-Bilanz; Lebenszyklus-Analyse; Personenkraftwagen

Abstract

The dominant drive technology on the roads of the future will be determined by its high environmental friendliness in comparison to other drive systems.

This master thesis gives an overview of the energy efficiency and the CO₂ balance of diesel, battery and fuel cell electric vehicles. In order to calculate the emitted CO₂ emissions of the vehicles, the areas of raw material provision, vehicle production, fuel production and driving mode have been used as variables. A comparison of these drive systems in three European countries (Austria, Poland and Italy) shows more precisely how environmentally friendly the various drive technologies are.

With regard to the argument of decarbonisation and electrification of the transport sector, hydrogen from electrolysis and synthetic diesel fuel have been considered in addition to the current conventional fuel production process for diesel and fuel cell electric vehicles. In general, it can be seen that vehicles whose fuel is obtained from electricity emit less greenhouse gases per kilometre in countries with a low CO₂ electricity mix than in countries with a CO₂-rich electricity mix. This also determines the relative advantage of electricity-based technology versus fossil fuel-based technology.

In addition to the CO₂ footprint of an electricity mix, the manufacture of vehicles is also a relevant environmental factor. Due to the accumulator in a battery electric vehicle (BEV) as well as the fuel cell and the hydrogen tank in a fuel cell electric vehicle (FCEV), these vehicles cause significantly more CO₂ emissions during production than a diesel vehicle. In order to designate this vehicle technology as the most environmentally friendly variant, building on the country-specific electricity mix, a certain mileage has to be achieved, which can reduce its CO₂ backpack from production. However, if a vehicle is used only moderately and reaches the calendar end significantly below a mileage of 100.000 km, the conventionally operated diesel vehicle is still the better alternative from an environmental point of view.

Keywords: battery electric vehicle; fuel cell electric vehicle; conventional vehicle; carbon footprint; life-cycle assessment; passenger car

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Hinführung zur Fragestellung	1
1.1 Mobilität im Alltag	1
1.2 Antriebstechnologie im Energiesystem	2
1.3 Effizienzvergleich auf Basis von Strom	5
1.3.1 Well-to-Wheel-Effizienzketten von dieselbetriebenen Fahrzeugen.....	5
1.3.2 Well-to-Wheel-Effizienzketten von batteriebetriebenen Fahrzeugen	7
1.3.3 Well-to-Wheel-Effizienzketten von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen	9
1.4 Forschungsfrage	11
1.5 Aufbau der Arbeit	12
2 Stand des Wissens	13
2.1 Grundlage der Antriebstechnologien.....	13
2.1.1 Konventionell betriebene Fahrzeuge - Der Verbrennungsmotor	13
2.1.2 Batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV).....	16
2.1.3 Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge (FCEV)	17
2.2 Fahrzeugstatistik	19
2.3 Externe Einflussfaktoren auf konventionelle und alternative Antriebstechnologien.....	22
2.3.1 Mobilitätsverhalten in Europa	22
2.3.2 Energiegewinnung in ausgewählten Ländern.....	24
2.3.2.1 Österreich	24
2.3.2.2 Polen.....	28
2.3.2.3 Italien	32
2.3.3 Fahrzeug- und Treibstoffherstellung.....	36
2.3.3.1 Fahrzeugproduktion	36
2.3.3.2 Treibstoffproduktion	38

3 Methodik der Datenauswertung.....	40
4 Ergebnisse	45
4.1 Indirekte und direkte Emissionen der Antriebstechnologien	45
4.1.1 Österreich	45
4.1.2 Polen	48
4.1.3 Italien	50
4.2 Nutzungsspezifische Emissionen der Antriebstechnologien	52
4.2.1 Österreich	52
4.2.2 Polen	54
4.2.3 Italien	57
5 Diskussion.....	60
6 Schlussfolgerung und Ausblick.....	62
7 Literaturverzeichnis	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Technische Daten unterschiedlicher Antriebstechnologien (Sternberg et al., 2019)	41
Tabelle 2:	Klimabilanz der Akkuproduktion (Emilsson & Dahllöf, 2019; Dai, et al., 2019; Kelly, et al., 2019; Recharge, 2018; Sternberg, et al., 2019; Agora Verkehrswende, 2019)	42
Tabelle 3:	CO ₂ -Emissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien aufgrund Fahrzeugherstellung, Energiebereitstellung und Fahrbetrieb (Nefzger, 2019; Sternberg et al., 2019; eigene Berechnung)	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Relativer Anteil an Wegen je Hauptverkehrsmittel (Modal-Split) (BMVIT, 2016) [Anm.: Stichprobe: n = 145.384 Wege]	2
Abbildung 2: Energiesystem von diesel-, brennstoffzellen- und batteriebetriebenen Fahrzeugen (Pröll, 2019).....	4
Abbildung 3: Wirkungsgradkette des Antriebes eines Dieselfahrzeuges im Bestpunkt (Springer Professional, 2012).....	5
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Antriebstranges eines Dieselfahrzeuges inkl. Energieverluste (U.S. Department of Energy, 2019b; Langmann, 2018)	6
Abbildung 5: Wirkungsgradkette des Antriebes eines batteriebetriebenen Fahrzeuges im Bestpunkt (Ramachandran und Stimming, 2015)	7
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Antriebstranges eines BEVs inkl. Energieverluste/-rückgewinnung (U.S. Department of Energy, 2019a; Ramachandran und Stimming, 2015).....	8
Abbildung 7: Wirkungsgradkette des Antriebes eines brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeuges im Bestpunkt (Ramachandran und Stimming, 2015)	9
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Antriebsstranges eines FCEVs inkl. Energieverluste/-rückgewinnung (Herzog, 2018; Ramachandran und Stimming, 2015; U.S. Department of Energy, 2019c).....	10
Abbildung 9: Die vier Takte beim Viertakt-Ottomotor (Paschotta, 2018)	15
Abbildung 10: Die vier Takte beim Viertakt-Dieselmotor (Paschotta, 2019)	16
Abbildung 11: Reaktion in einer Brennstoffzelle (Ehret, 2018).....	18
Abbildung 12: Europäischer Fahrzeugbestand nach Kraftstoffarten im Jahr 2016 in Prozent (Eurostat, 2019); [Anm.: (1) Daten vom Jahr 2015; Keine Daten vorhanden von Bulgarien, Griechenland, Niederlande, Slowakei und Island].....	20
Abbildung 13: Prozentueller Bestand und Neuzulassung von konventionellen, batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen in Österreich im Jahr 2018 (Statistik Austria, 2018)	21
Abbildung 14: Weglänge pro Autofahrt der Österreicherinnen und Österreicher (VCÖ, 2017a)	23
Abbildung 15: Stromproduktion durch verschiedene Energieträger zwischen 1990 und 2016 in Österreich (IEA, 2018).....	25
Abbildung 16: CO ₂ -Emissionsintensität der Stromerzeugung zwischen 1990 und 2016 in Österreich (EEA, 2019).....	26
Abbildung 17: Energetischer Endverbrauch von Österreich im Jahr 2016 nach Sektoren in Prozent (Eurostat, 2018b)	27
Abbildung 18: Stromproduktion durch verschiedene Energieträger zwischen 1990 und 2016 in Polen (IEA, 2018)	29
Abbildung 19: CO ₂ -Emissionsintensität der Stromerzeugung zwischen 1990 und 2016 in Polen (EEA, 2019).....	30

Abbildung 20: Energetischer Endverbrauch von Polen im Jahr 2016 nach Sektoren in Prozent (Eurostat, 2018b)	31
Abbildung 21: Stromproduktion durch verschiedene Energieträger zwischen 1990 und 2016 in Italien (IEA, 2018)	33
Abbildung 22: CO ₂ -Emissionsintensität der Stromerzeugung zwischen 1990 und 2016 in Italien (EEA, 2019).....	34
Abbildung 23: Energetischer Endverbrauch von Italien im Jahr 2016 nach Sektoren in Prozent (Eurostat, 2018b).....	35
Abbildung 24: CO ₂ -Emissionen durch die Herstellung von verschiedenen Antriebstechnologien (Nefzger, 2019; eigene Berechnung)	37
Abbildung 25: Systemgrenze für die CO ₂ -Bilanzierung unterschiedlicher Antriebstechnologien (eigene Darstellung).....	40
Abbildung 26: CO ₂ -Gesamtemissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien am Beispiel Österreich (eigene Darstellung)	47
Abbildung 27: CO ₂ -Gesamtemissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien am Beispiel Polen (eigene Darstellung)	49
Abbildung 28: CO ₂ -Gesamtemissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien am Beispiel Italien (eigene Darstellung)	51
Abbildung 29: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien in Österreich (eigene Darstellung)	53
Abbildung 30: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien pro gefahrenen Kilometer in Österreich (eigene Darstellung).....	54
Abbildung 31: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien in Polen (eigene Darstellung).....	55
Abbildung 32: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien pro gefahrenen Kilometer in Polen (eigene Darstellung)	56
Abbildung 33: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien in Italien (eigene Darstellung).....	58
Abbildung 34: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien pro gefahrenen Kilometer in Italien (eigene Darstellung).....	59

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
Anm.	Anmerkung
AT	Österreich
BEV	Battery Electric Vehicle
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CV	Conventional Vehicle
el.	elektrisch
eq	Äquivalent
et al.	et alii
EU	Europäische Union
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FTS	Fischer-Tropsch-Synthese
g.	Gramm
GWh	Gigawattstunden
H	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
Hrsg.	Herausgeber
inkl.	inklusive
IT	Italien
Kfz	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
konv.	konventionell
kWh	Kilowattstunde
LKW	Lastkraftwagen
Mio.	Million
MIV	Motorisierter Individualverkehr
Mrd.	Milliarde
MSR	Erdgas-Dampfreformierung
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PKW	Personenkraftwagen
PL	Polen
PV	Photovoltaik
SUV	Sport Utility Vehicle
TtW	Tank-to-Wheel
vgl.	vergleiche
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WtT	Well-to-Tank
WtW	Well-to-Wheel

1 Einleitung und Hinführung zur Fragestellung

1.1 Mobilität im Alltag

Mobilität spielt in unserer heutigen Gesellschaft eine große Rolle und mobil zu sein ist für viele Menschen zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Allein für den Zugang zu Bildung, Arbeit und Versorgung sowie auch zu kulturellen und politischen Geschehen ist Mobilität unverzichtbar, wodurch sie auch immer wieder als Grundbedürfnis verstanden wird (Lenz, 2012).

Wie die Mobilität in der Praxis aussieht, kann anhand von Österreich kurz dargestellt werden. Grundsätzlich ist heute jede mobile Person im Durchschnitt 85 Minuten pro Tag unterwegs. Dieser Wert ist auch über die Jahrzehnte in etwa gleich geblieben. Was sich jedoch geändert hat, ist die Weglänge, die pro Tag zurückgelegt wird. Diese ist im Vergleich zu 1995 um 16 % gestiegen, was einer mittleren Weglänge von 43 km pro Tag entspricht (BMVIT, 2016).

Mit welchem Verkehrsmittel die Österreicher und Österreicherinnen ihre Wege zurücklegen, ist in Abbildung 1 schön ersichtlich. Über die Woche hinweg gibt es immer wieder Schwankungen im Bereich des öffentlichen Verkehrs (ÖV), welcher an den Werktagen deutlich öfters genutzt wird, als an den Wochenenden. Umgekehrt ändert sich der Anteil des Bereiches der motorisierten Individualverkehr (MIV)-MitfahrerIn. Weist dieser Bereich an Werktagen nur 12 % auf, steigt er jedoch am Wochenende auf 23–27 % an. Diese Änderungen der beiden Verkehrsmittel über die Woche lässt sich dadurch erklären, dass einerseits der Freizeit- und Besuchsverkehr eher in Form von familiären Fahrgemeinschaften durchgeführt wird und nicht so ÖV-orientiert ist wie der Berufs- und Ausbildungspendlerverkehr, andererseits das ÖV-Angebot an Sonn- und Feiertagen gegenüber den anderen Wochentagen deutlich ausgedünnt ist. Die Bereiche des Rad- und Fußverkehrs weisen über die Woche eher einen konstanten Anteil auf (BMVIT, 2016).

Jener Bereich der gegenüber den anderen Verkehrsmitteln hervorsticht, ist der Bereich der MIV-LenkerIn. Dieser unterliegt zwar in Laufe der Woche leichten Schwankungen, stellt aber im Durchschnitt das Verkehrsmittel dar, das am häufigsten von den Östreichern und Östreicherrinnen genutzt wird. Somit nimmt der motorisierte Individualverkehr eine wichtige Rolle im Bereich der Mobilität ein. Aufgrund dessen bezieht sich auch diese Arbeit auf den Bereich des motorisierten

Individualverkehrs und wird diesen in den verschiedensten Aspekten genauer durchleuchten.

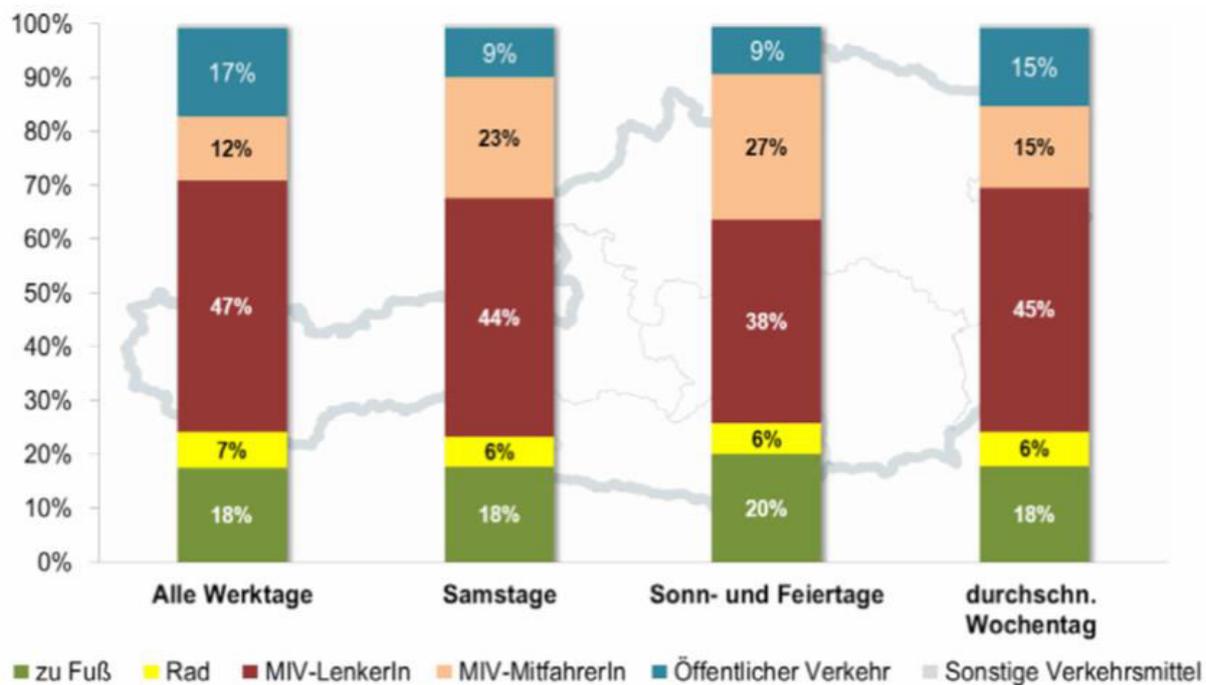


Abbildung 1: Relativer Anteil an Wegen je Hauptverkehrsmittel (Modal-Split) (BMVIT, 2016) [Anm.: Stichprobe: n = 145.384 Wege]

1.2 Antriebstechnologie im Energiesystem

Wie oben bereits erwähnt liegt der Fokus dieser Arbeit auf den MIV, genauer gesagt auf PKWs. Der in den letzten Jahren immer stärker werdende Umweltgedanke spiegelt sich auch deutlich im Bereich der Mobilität. Effizienz und Umweltfreundlichkeit ist hier die Devise. Diesbezüglich entstanden im Laufe der Zeit verschiedenste Antriebssysteme für den Straßenverkehr, sogenannte „alternative Antriebskonzepte“, welche versuchen dieses Motto zu unterstreichen. Um deren Effizienz und Umweltfreundlichkeit herauszufinden, muss man solche Systeme mit dem derzeit etablierten konventionellen Antriebskonzept vergleichen. Da die genaue Betrachtung der derzeit existierenden Antriebssysteme das Maß dieser Arbeit sprengen würde, wird der Vergleich auf drei Fahrzeugtypen beschränkt. Aus dem Bereich des konventionellen Antriebssystems wird ein Dieselfahrzeug einem Elektrofahrzeug mit Lithium-Ionen-Akku und einem Brennstoffzellenfahrzeug, welche dem Bereich der alternativen Antriebssysteme angehören, gegenübergestellt.

Um einen solchen Vergleich zwischen den genannten Antriebstechnologien aufzustellen, bedient man sich des Instruments der „Well-to-Wheel (WtW)“-Analyse. Hierbei wird die Gewinnung und Bereitstellung eines Treibstoffs bzw. Energieträgers bis zu dessen Umwandlung in Bewegungsenergie in den jeweiligen Fahrzeugtypen bewertet. Um exaktere Aussagen treffen zu können, werden die Resultate dieser Analyse in zwei Systeme aufgespaltet und zwar in „Well-to-Tank (WtT)“ und „Tank-to-Wheel (TtW)“. Im erstgenannten System betrachtet man den Abschnitt der Rohstoffgewinnung für die Treibstoffproduktion bis hin zum fertigen Treibstoff im Fahrzeugtank. Im TtW-System wird hingegen der Betrieb des jeweiligen Fahrzeuges durchleuchtet, womit die Umwandlung des Treibstoffs in Bewegungsenergie je nach Fahrzeugtechnologie gemeint ist (FIS, 2019b).

Wie der Ablauf einer WtW-Analyse in der Praxis in etwa aussieht, ist in Abbildung 2 gut ersichtlich. Hier hat man zunächst auf der linken Seite die Primärenergieträger, die einerseits in fossile und erneuerbare Energieträger aufgesplittert werden können. Mittels Pfeilen ist dargestellt, welche Sekundärenergie aus den jeweiligen Primärenergieträgern gewonnen werden kann. Da es eine Vielzahl von Möglichkeiten gibt, Sekundärenergie zu gewinnen, ist die derzeit gängige Variante mit roten Pfeilen gekennzeichnet. Somit wird Dieselkraftstoff hauptsächlich aus Erdöl und Wasserstoff zum Großteil aus Erdgas gewonnen (Paschotta, 2020; Klell, et al., 2018). Auch bei der weltweiten Stromerzeugung nehmen fossile Energieträger noch immer eine Vorreiterrolle ein, jedoch spielen erneuerbare Energieträger hierbei zunehmend eine bedeutende Rolle (IEA, 2018).

Unabhängig von welchem Primärenergieträger die Sekundärenergie gewonnen wird, ist es im weiteren Schritt möglich, diese Energie entweder einer weiteren Umwandlung zu unterziehen und dadurch zu einer anderen Sekundärquelle zu gelangen oder die Energie sofort der jeweiligen Fahrzeugtechnologie zur Verfügung zu stellen.

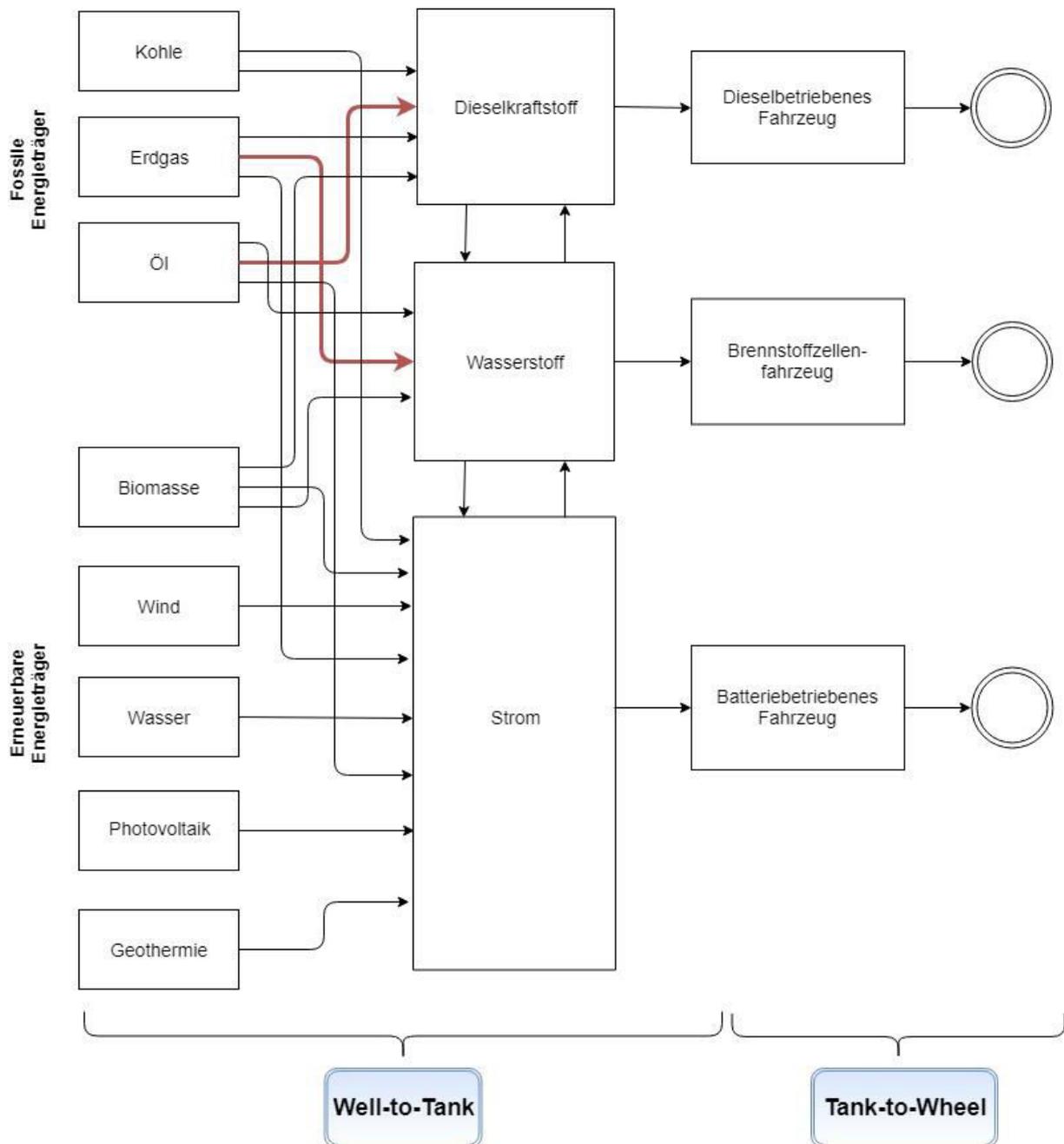


Abbildung 2: Energiesystem von diesel-, brennstoffzellen- und batteriebetriebenen Fahrzeugen (Pröll, 2019)

Da in den letzten Jahren von unterschiedlichen politischen und gesellschaftlichen Akteuren sowie NGOs immer häufiger über Dekarbonisierung und Elektrifizierung des Verkehrssektors diskutiert wird, ist diesbezüglich ein auf der Sekundärquelle „Strom“ basierender Effizienzvergleich der drei bereits erwähnten Antriebstechnologien notwendig. Im folgenden Kapitel wird auf diesen Vergleich genauer eingegangen.

1.3 Effizienzvergleich auf Basis von Strom

In diesem Abschnitt werden die drei Antriebstechnologien Diesel-, Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug basierend auf der WtW-Analyse im Einzelnen betrachtet. Um einen objektiven Vergleich zu ermöglichen, wird von einer gemeinsamen Komponente ausgegangen, und zwar von dem Sekundärenergieträger „Strom“. Aufgrund der WtW-Analyse errechnet sich für jeden Fahrzeugtyp ein Gesamtwirkungsgrad, aus welchem man schließen kann, wie effizient die jeweilige Antriebstechnologie arbeitet.

1.3.1 Well-to-Wheel-Effizienzketten von dieselbetriebenen Fahrzeugen

Damit man die Effizienz eines Dieselfahrzeuges aufzeigen kann, ist das Hinzuziehen der Wirkungsgrade seiner technischen Antriebskomponenten unumgänglich. Um detaillierte Ergebnisse dieses Fahrzeugtyps zu erhalten, wird die WtW-Analyse in ihren zwei Bestandteilen betrachtet. Zunächst wird das Dieselfahrzeug im Betriebszustand charakterisiert, wobei man hier zwischen der Wirkungsgradkette im Bestpunkt und im Praxisbetrieb unterscheidet.

Wirkungsgradkette im Bestpunkt:



Abbildung 3: Wirkungsgradkette des Antriebes eines Dieselfahrzeuges im Bestpunkt (Springer Professional, 2012)

Um die Effizienz von dieselbetriebenen Fahrzeugen herauszufinden, muss man den gesamten Antriebsstrang des Fahrzeuges betrachtet. Dabei werden die Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten des Antriebsstranges multipliziert, wodurch man zu einem Wirkungsgrad im Bestpunkt von etwa 41 % kommt (vgl. Abbildung 3) (Springer Professional, 2012). Dieser Wirkungsgrad wird in der Praxis eher selten bis kaum erreicht, da während des Fahrbetriebes Energieverluste verteilt über den gesamten Antriebsstrang auftreten (siehe Abbildung 4).

Wirkungsgradkette im Betrieb:

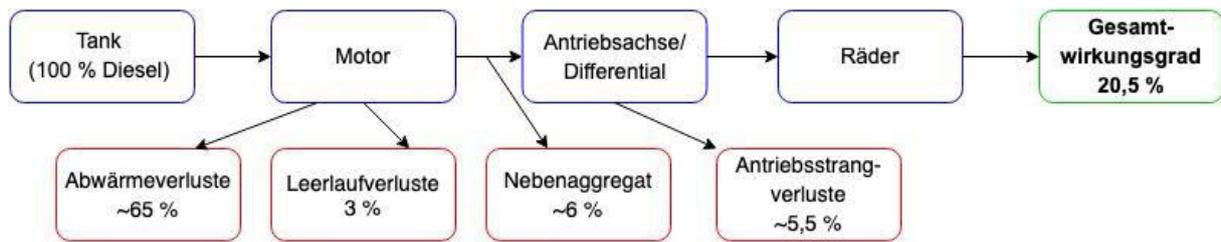


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Antriebstranges eines Dieselfahrzeuges inkl. Energieverluste (U.S. Department of Energy, 2019b; Langmann, 2018)

Wie oben bereits erwähnt gelangt die Energie, die im Dieselmotorkraftstoff steckt, nicht zur Gänze zu den Rädern. Betrachtet man die Effizienzketten von Dieselfahrzeugen im Praxisbetrieb, merkt man schnell, dass die meiste Energie durch den Motor in Form von Abwärme verloren geht. Aufgrund weiterer Energieverluste durch den Leerlauf, den Antriebsstrang und den Nebenaggregaten kommt man schlussendlich auf einen Gesamtwirkungsgrad von 20,5 %, was deutlich unter dem Wirkungsgrad im Bestpunkt liegt (U.S. Department of Energy, 2019b; Langmann, 2018).

Der nun dargestellte Wirkungsgrad zeigt, wie effizient die Technologie eines Dieselfahrzeuges arbeitet. Möchte man jedoch einen Vergleich mit anderen Fahrzeugtypen aufstellen, muss auch der Abschnitt der Rohstoffgewinnung für die Treibstoffproduktion bis hin zum fertigen Treibstoff betrachtet werden. Damit ein realistischer Vergleich zwischen den verschiedenen Antriebstechnologien möglich ist, muss als Rohstoff für die Treibstoffgewinnung eine für alle Fahrzeugtypen einheitliche Ausgangsgröße gewählt werden. Im Falle dieses Vergleiches wird Strom als Ausgangsstoff festgelegt. Die Rohstoffgewinnung von Strom selbst wird hier zunächst vernachlässigt.

Um nun mittels Strom den für dieselbetriebene Fahrzeuge notwendigen Dieselmotorkraftstoff herzustellen, wird das sogenannte „Power-to-Liquid“-Verfahren angewendet. Mit Hilfe von Strom kann zunächst durch die Wasserelektrolyse Wasserstoff erzeugt werden. In einem Syntheseprozess wird der Wasserstoff dann mit Kohlenmonoxid oder -dioxid zu Kohlenwasserstoff umgewandelt. Dies geschieht zum Beispiel mit der Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) oder mit der Methanolsynthese. Nach der Abscheidung des gebildeten Wassers können die Kohlenwasserstoffe durch Raffinerieprozesse zu Brenn- und Kraftstoffen sowie zu Chemikalien weiterverarbeitet werden (dos Santos, 2019).

Sieht man sich nun die Effizienz der einzelnen Teilabschnitte dieses Prozesses an, merkt man, dass relativ viel Energie verloren geht. Schon im ersten Schritt des Verfahrens, also der Elektrolyse, hat man einen Energieverlust von 30 %. Dies wird jedoch von der FTS und der CO₂-Abscheidung übertroffen, dessen Abschnitt einen Verlust von 37 % Energie aufweist. Damit ergibt sich, ausgehend von 100 % Strom, eine Treibstoffproduktionseffizienz von 44 % (VCÖ, 2017b).

Durch die vorliegenden Effizienzzahlen kann nun der gesamte Wirkungsgrad für Dieselfahrzeuge berechnet werden. Multipliziert man den Gesamtwirkungsgrad aus der TtW-Analyse mit dem Wirkungsgrad der Treibstoffproduktion erhält man eine „**Well-to-Wheel**“-Gesamteffizienz von rund **9 %**.

1.3.2 Well-to-Wheel-Effizienzkette von batteriebetriebenen Fahrzeugen

Dem dieselbetriebenen Fahrzeug wird nun das batteriebetriebene Fahrzeug gegenübergestellt. Auch hier wird zunächst die TtW-Analyse aufgezeigt, in welcher, wie auch im vorherigen Kapitel, die Wirkungsgradketten von batteriebetriebenen Fahrzeugen im Bestpunkt und im Praxisbetrieb dargestellt werden.

Wirkungsgradkette im Bestpunkt:

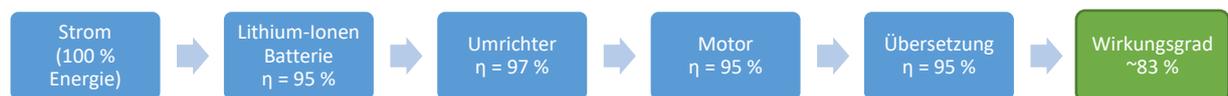


Abbildung 5: Wirkungsgradkette des Antriebes eines batteriebetriebenen Fahrzeuges im Bestpunkt (Ramachandran und Stimming, 2015)

Wie beim dieselbetriebenen Fahrzeug wird auch beim batteriebetriebenen Fahrzeug der gesamte Antriebsstrang betrachtet, um dessen Effizienz herauszufinden. Dafür werden die Wirkungsgrade von der Lithium-Ionen Batterie, dem Umrichter, dem Elektromotor und der Übersetzung miteinander multipliziert, wodurch man zu einer Effizienz von 83 % kommt (vgl. Abbildung 5) (Ramachandran und Stimming, 2015). Dieser Wert entspricht jedoch wieder dem theoretischen Wirkungsgrad. Auch hier kommt es über den gesamten Antriebsstrang zu Energieverlusten, weshalb man in der Praxis ebenfalls eine geringere Effizienz errechnet (siehe Abbildung 6).

Wirkungsgradkette im Betrieb:

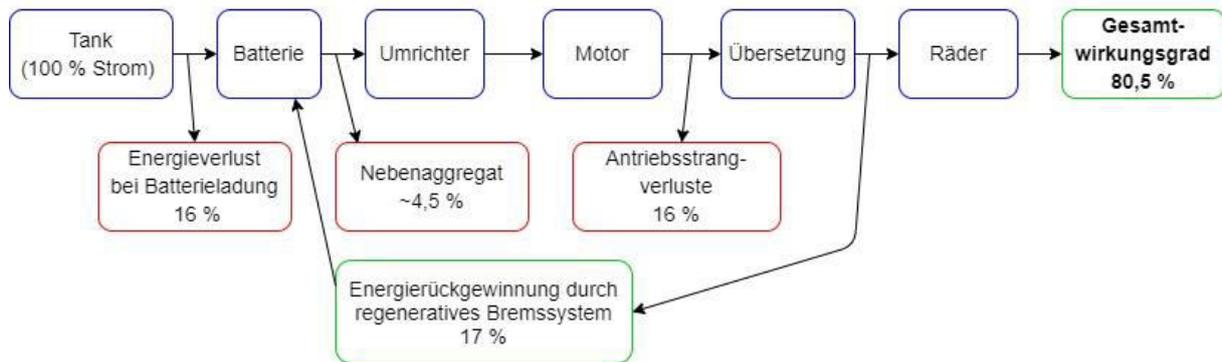


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Antriebstranges eines BEVs inkl. Energieverluste/-rückgewinnung (U.S. Department of Energy, 2019a; Ramachandran und Stimming, 2015)

Der Großteil der Energie geht bei batteriebetriebenen Fahrzeugen im Praxisbetrieb einerseits bei der Batterieladung andererseits aufgrund von Antriebsstrangverlusten verloren. Der Energieverlust beträgt hier jeweils 16 %. Weitere 4,5 % an Energie gehen aufgrund der Nebenaggregate verloren. Der Vorteil von batteriebetriebenen Fahrzeugen ist jedoch, dass sie zusätzlich mit einem regenerativen Bremssystem ausgestattet sind. Darunter versteht man, dass bei einer Bremsung der Antriebsmotor zum Generator wird und die Trägheit des Fahrzeuges wiederum Strom produziert, welcher in die Batterie zurückgespeist wird (U.S. Department of Energy, 2019a). Dadurch können 17 % der Anfangsenergie zurückgewonnen werden, wodurch man schlussendlich auf einen Gesamtwirkungsgrad von 80,5 % kommt (U.S. Department of Energy, 2019a; Ramachandran und Stimming, 2015). Auffällig ist hier, dass der Wirkungsgrad im Praxisbetrieb nur sehr gering vom Wirkungsgrad im Bestpunkt abweicht.

Damit ein realistischer Vergleich mit den andern beiden Antriebstechnologien möglich ist, wird auch hier die WtT-Analyse erläutert, wobei, wie oben bereits erwähnt, Strom als Ausgangsbasis dient. Da das batteriebetriebene Fahrzeug mittels elektrischer Energie betrieben wird, muss in diesem Abschnitt grundsätzlich auf Transport, Speicherung und Distribution der Energie eingegangen werden. Insgesamt kommt es dabei zu einem Energieverlust von 5 %, was somit eine Treibstoffproduktionseffizienz von 95 % ausmacht (VCÖ, 2017b).

Um nun die WtW-Gesamteffizienz von batteriebetriebenen Fahrzeugen zu erhalten, multipliziert man wiederum den TtW-Wirkungsgrad mit dem Wirkungsgrad der

Treibstoffproduktion. Somit ergibt sich für das batteriebetriebene Elektrofahrzeug eine „**Well-to-Wheel**“-**Gesamteffizienz** von rund **76 %**.

1.3.3 Well-to-Wheel-Effizienzketten von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen

Abschließend wird nun das brennstoffzellenbetriebene Fahrzeug dem dieselbetriebenen und dem batteriebetriebenen Fahrzeug gegenübergestellt. Wie auch bei den oben bereits genannten Antriebstechnologien, sieht man sich zunächst die TtW-Analyse mit der Wirkungskette im Bestpunkt und im Betrieb an. Anschließend wird wieder auf den Bereich der WtT-Analyse eingegangen, um die Gesamteffizienz des brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeuges darstellen zu können.

Wirkungsgradkette im Bestpunkt:



Abbildung 7: Wirkungsgradkette des Antriebes eines brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeuges im Bestpunkt (Ramachandran und Stimming, 2015)

Damit man die Effizienz dieses Fahrzeuges im Bestpunkt darstellen kann, sieht man sich wiederum die Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten des Antriebsstranges an. Beim brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeug sind das unter anderem die Brennstoffzelle mit 55 %, der Umrichter mit 95 %, der Motor mit 95 % und die Übersetzung mit ebenfalls 95 %. Durch die Multiplikation dieser Komponenten erreicht man einen theoretischen Wirkungsgrad von etwa 48 % (vgl. Abbildung 7) (Ramachandran und Stimming, 2015). Der Wirkungsgrad in der Praxis ist, wie auch bei den anderen beiden Antriebstechnologien, wiederum durch Energieverluste geprägt, weshalb die Effizienz im Betrieb von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen geringer ausfällt, als in der Theorie (siehe Abbildung 8).

Wirkungsgradkette im Betrieb:

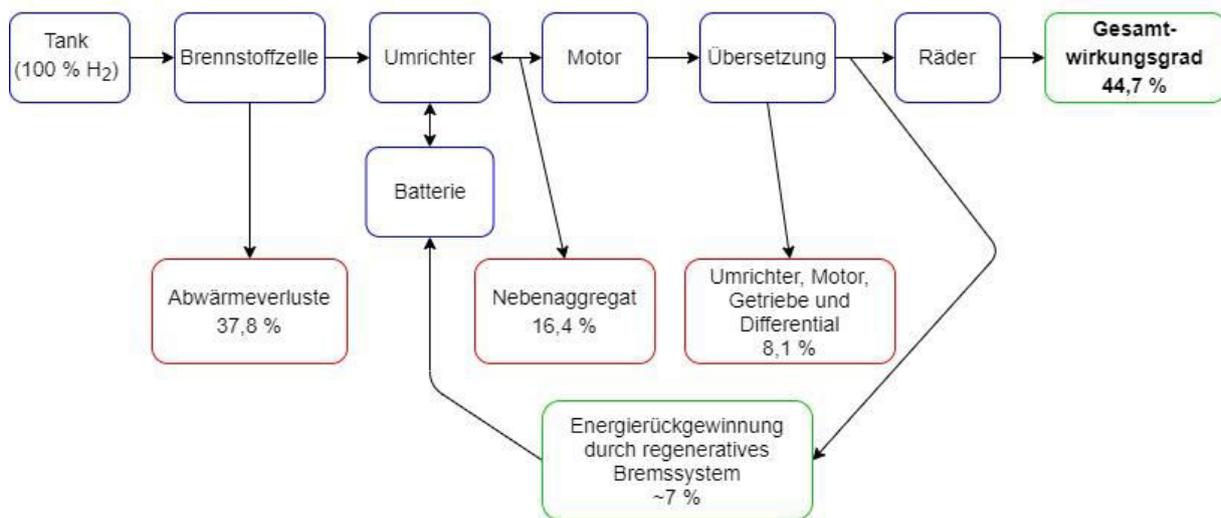


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Antriebsstranges eines FCEVs inkl. Energieverluste/-rückgewinnung (Herzog, 2018; Ramachandran und Stimming, 2015; U.S. Department of Energy, 2019c)

Ähnlich wie beim dieselbetriebenen Fahrzeug geht auch beim Brennstoffzellenfahrzeug der größte Teil der Energie in Form von Abwärme verloren. Insgesamt beträgt dieser Energieverlust 37,8 %. Sieht man sich den übrigen Teil des Antriebsstranges an, kommen weitere Verluste durch Nebenaggregate, Umrichter, Motor, Getriebe und Differential hinzu, wodurch nochmals 24,5 % an Energie verloren gehen (Herzog, 2018; Ramachandran und Stimming, 2015). Da das brennstoffzellenbetriebene Fahrzeug ähnlich aufgebaut ist wie das batteriebetriebene Fahrzeug, besitzt es ebenfalls ein regeneratives Bremssystem, mit welchem wiederum 7 % an Energie zurückgewonnen werden können (U.S. Department of Energy, 2019c). In Summe kommt man somit beim Brennstoffzellenfahrzeug auf einen Gesamtwirkungsgrad von 44,7 %.

Ausgehend von der Basisgröße „Strom“ sieht man sich nun im Weiteren an, welche Energieverluste in der WtT-Analyse für brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge auftreten. Da dieses Fahrzeug Wasserstoff für den Antrieb benötigt, muss zunächst geklärt werden, wie man diesen aus Strom herstellt. Im Grunde wurde diese Frage im Kapitel 1.3.1 bereits beantwortet, und zwar durch das Elektrolyseverfahren. Dadurch erhält man den notwendigen Wasserstoff, mit welchem ein Brennstoffzellenfahrzeug angetrieben wird. Wie jedoch auch schon erwähnt, kommt es hierdurch zu einem Energieverlust von 30 %. Dies ist jedoch nicht der einzige

Verlust an Energie in der WtT-Kette. Ähnlich wie beim batteriebetriebenen Fahrzeug verlaufen der Transport, die Speicherung und die Verteilung von Wasserstoff nicht ohne Energieverluste. Verglichen jedoch mit der Verteilung von Strom geht hier deutlich mehr Energie verloren. Auf insgesamt 26 % beläuft sich dabei der Energieverlust. Damit ergibt sich nun eine Treibstoffproduktions-effizienz von 52 % (VCÖ, 2017b).

Durch die Multiplikation der Wirkungsgrade aus den beiden Analysen erlangt man wiederum die „**Well-to-Wheel**“-**Gesamteffizienz** von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen. Insgesamt erhält man dafür einen Wert von **23 %**.

Aufgrund der vorliegenden Zahlen ist es nun möglich die drei Fahrzeugtypen miteinander zu vergleichen. Bei der Betrachtung der jeweiligen „Well-to-Wheel“-Gesamteffizienz wird schnell klar welche Antriebstechnologie am effizientesten arbeitet, und zwar jene des batteriebetriebenen Fahrzeuges. Dieser Fahrzeugtyp arbeitet fast dreieinhalb Mal effizienter als brennstoffzellenbetriebene und fast achteinhalb Mal effizienter als dieselbetriebene Fahrzeuge. Bezogen auf diesen Aspekt hätte somit das batteriebetriebene Fahrzeug das Rennen gewonnen.

1.4 Forschungsfrage

Am obigen Beispiel lässt sich gut zeigen, wie effizient die drei Antriebstechnologien im Gesamten abschneiden, wenn der für ihren Antrieb notwendige Treibstoff auf Strom basiert. Bei einer Bewertung von unterschiedlichen Antriebstechnologien ist der Wirkungsgrad jedoch nur ein Aspekt von vielen der betrachtet werden muss. Ein weiterer immer wichtiger werdender Punkt stellt die Umweltfreundlichkeit des jeweiligen Fahrzeugtyps dar. Zöge man diesen hinzu, wie würden dann die genannten Fahrzeugtechnologien abschneiden? Dabei wäre jedoch nicht nur der Fahrzeugbetrieb alleine gemeint, sondern auch die Fahrzeugproduktion sowie die Energiebereitstellung für den Betrieb der einzelnen Fahrzeugtypen. Ebenso stellt die Fahrzeugnutzungsintensität einen entscheidenden Faktor für die Umweltfreundlichkeit der Antriebstechnologien dar.

Aufbauend auf die soeben genannten Aspekte wurden folgende Forschungsfragen formuliert:

- *Wie sieht die CO₂-Bilanz von diesel-, batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen aus und wie beeinflusst der nationale Strom-Mix verschiedener Länder die Antriebstechnologien hinsichtlich ihrer Umweltfreundlichkeit?*
- *Welche CO₂-Emissionsmengen verursachen die Antriebstechnologien während der Nutzungsphase und wie sieht deren Klimafreundlichkeit bei unterschiedlichem Nutzungsverhalten aus?*

1.5 Aufbau der Arbeit

Die folgende Masterarbeit gliedert sich in sechs Abschnitte. Nach der Einführung in das Thema im ersten Kapitel, bekommt der Leser in Kapitel zwei theoretische Grundlagen bezüglich der in der Einleitung genannten Antriebstechnologien sowie die derzeitige Fahrzeugstatistik in Europa vermittelt. Anschließend werden die Einflussfaktoren auf konventionelle und alternative Antriebssysteme erläutert. Darunter fallen das Mobilitätsverhalten sowie die Herstellung und Energiegewinnung für die beschriebenen Antriebssysteme. Im dritten Kapitel wird die Datenerhebungsmethodik der Arbeit beschrieben und im darauffolgenden Abschnitt werden dann die Ergebnisse präsentiert. Abschließend werden die Resultate diskutiert und folglich ein Ausblick generiert.

2 Stand des Wissens

2.1 Grundlage der Antriebstechnologien

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der oben genannten Fahrzeugtechnologien erläutert. Zunächst werden ein Überblick sowie der Stand der Technik von konventionellen Antriebstechnologien beschrieben. Auf batterie- und brennstoffzellenbetriebene Elektrofahrzeuge wird im Folgenden genauer eingegangen.

2.1.1 Konventionell betriebene Fahrzeuge - Der Verbrennungsmotor

Zu den Fahrzeugen mit konventioneller Antriebstechnologie zählen all jene, die mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sind (FIS, 2019a).

Die Erfindung des Verbrennungsmotors geht auf Jean-Joseph Étienne Lenoir (1822–1900) im Jahre 1858 zurück. Dessen Antriebsmaschine fungiert als stationärer Gasmotor, welcher nach dem Zweitaktprinzip funktioniert (wertpapiergeschichte, 2017).

Auf Basis des Lenoir-Motors entwickelte Nikolaus August Otto (1832–1891) den sogenannten Ottomotor (wertpapiergeschichte, 2017). Mit dem 4-Takt-Prinzip, welches erstmals auf der Pariser Weltausstellung 1877 vorgestellt wurde, entwickelte Otto ein Konzept, das noch heute eines der wichtigsten Funktionsprinzipien von Diesel- und Benzinmotoren darstellt (Werner, 2012).

Funktion eines Verbrennungsmotors

Verbrennungsmotoren beziehen die im Kraftstoff chemisch gebundene Energie und wandeln diese in Wärme und mechanische Arbeit um (Pischinger und Seiffert, 2016). Neben den unterschiedlichen Bauformen der Kraftfahrzeugmotoren kommt der Hubkolben-Verbrennungsmotor am häufigsten zum Einsatz (Pischinger und Seiffert, 2016). Allgemein betrachtet arbeiten alle Verbrennungsmotoren nach demselben Prinzip: Ein Luft-Kraftstoffgemisch wird in einer speziellen Brennkammer entzündet, wodurch es zu einer Ausdehnung dieses Gemisches kommt. Es drückt dabei auf einen beweglichen Kolben, der die Bewegungsenergie auf eine Welle oder Achse überträgt (Werner, 2012).

Wie oben bereits erwähnt, ist das 4-Takt-Prinzip heute noch immer das bedeutendste Konzept bei Benzin- und Dieselmotoren. Unter diesem Prinzip versteht man die Arbeit eines Verbrennungsmotors, die in vier aufeinanderfolgenden Teilschritten verrichtet wird. Diese vier Arbeitsschritte teilen sich auf in:

- 1. Takt – Ansaugen
- 2. Takt – Verdichten
- 3. Takt – Arbeiten
- 4. Takt – Ausstoßen.

Ein Takt entspricht entweder einer Auf- bzw. Abwärtsbewegung des Kolbens (Hub) (Werner, 2012).

Unterscheidung Benzin- und Dieselmotor

Der Unterschied der beiden Motoren zeigt sich, wenn man sich die vier Arbeitsschritte des Verbrennungsmotors genauer ansieht.

Beim Benzinmotor wird zunächst ein Kraftstoff-Luftgemisch angesaugt, welches im darauffolgenden Schritt durch den Kolben komprimiert wird. Dadurch erhitzt sich das Gemisch, entzündet sich jedoch nicht. Um die notwendige Explosion herbeizuführen, befindet sich im Zylinderkopf eine Zündkerze bzw. eine Zündanlage, welche den Gasnebel durch einen elektrischen Funken in Brand setzt. Dieser Vorgang wird auch als Fremdzündung verstanden. Im letzten Schritt wird das entstehende Abgas ausgestoßen (Paschotta, 2018).

Bei dieser Verbrennungsmotorart wird somit ein vorgemischtes Kraftstoff-Luftgemisch in den Brennraum gesaugt (Vergasermotor) oder eingespritzt (Einspritzmotoren) und dann von außen gezündet (vgl. Abbildung 9) (Werner, 2012).

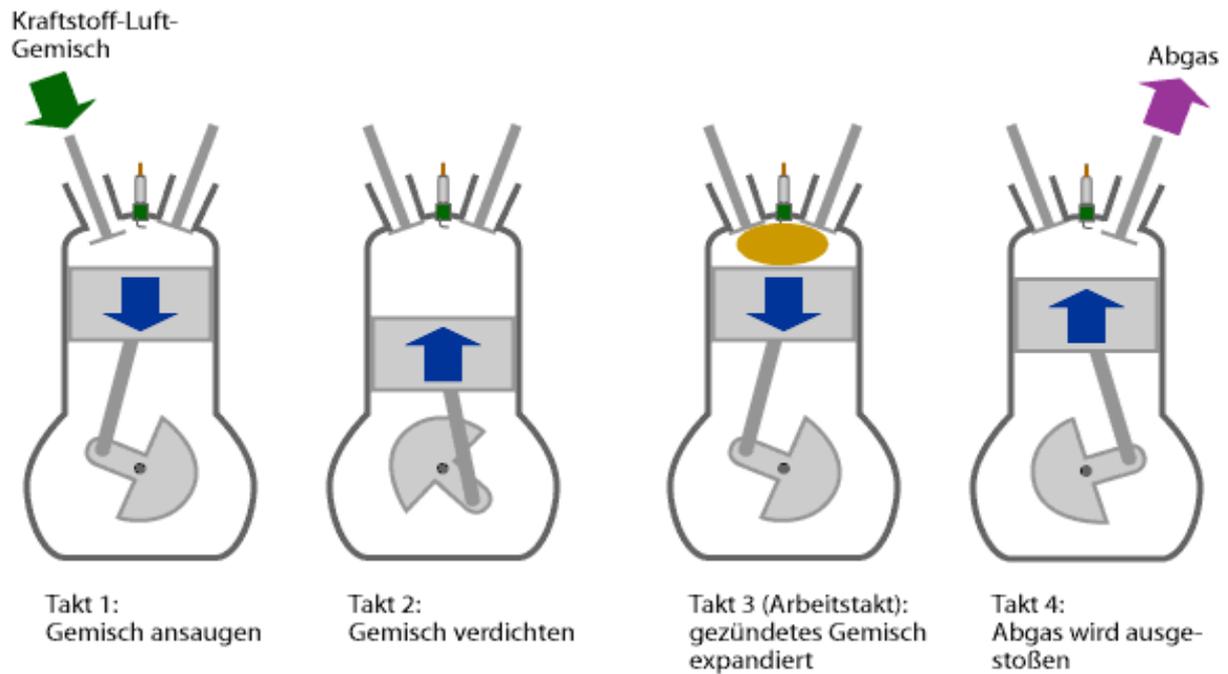


Abbildung 9: Die vier Takte beim Viertakt-Ottomotor (Paschotta, 2018)

Das Prinzip eines Dieselmotors, welches im Jahre 1892 von Rudolf Diesel (1858–1913) entwickelt wurde, unterscheidet sich dadurch, dass zunächst nur reine Luft angesaugt wird. Bei Komprimierung der Luft durch den Kolben im Zylinder steigt die Temperatur auf über 600 bis 900 °C, wodurch es beim Einspritzen eines zerstäubten Dieselmotorkraftstoffes zu einer Entzündung kommt. Es findet somit eine Selbstzündung statt. Schlussendlich wird wieder im letzten Takt das Abgas ausgestoßen (vgl. Abbildung 10) (Paschotta, 2019).

Da bei kalten Motoren die Kompressionswärme nicht ausreicht den Kraftstoff zu entzünden, wird der Zylinder vor dem Start mit einer Glühkerze angewärmt. Nach der Warmlaufphase läuft der Verbrennungsprozess jedoch aus eigener Kraft und ohne zusätzliche Zündvorrichtung ab (Werner, 2012).

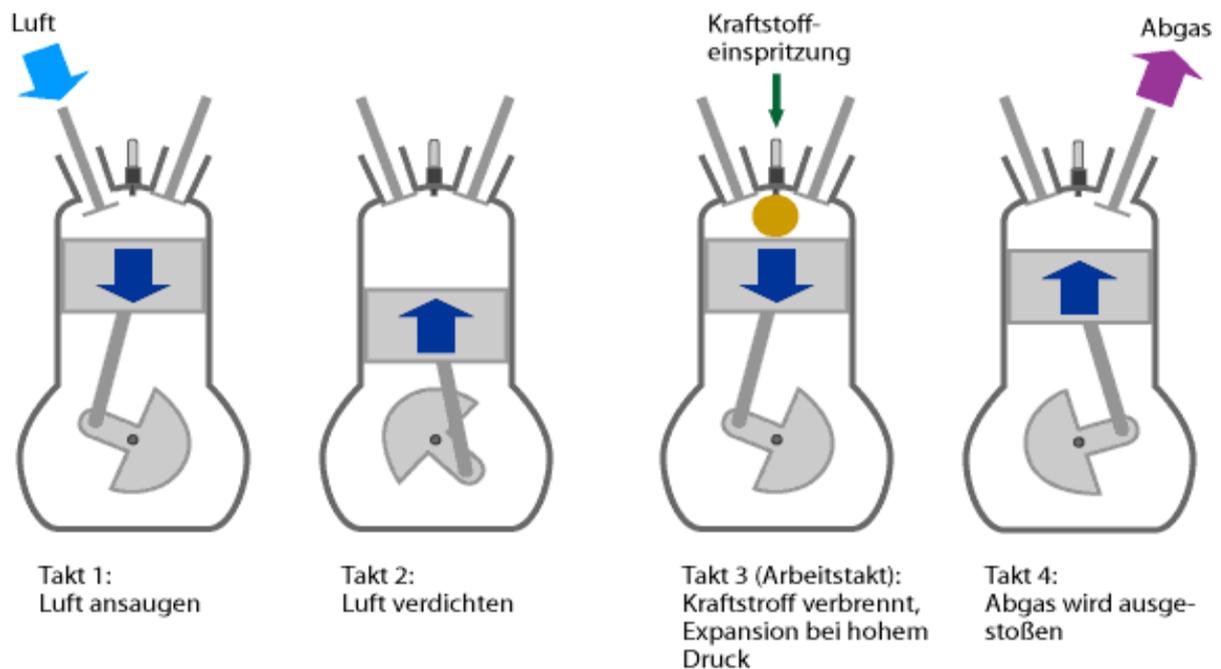


Abbildung 10: Die vier Takte beim Viertakt-Dieselmotor (Paschotta, 2019)

2.1.2 Batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV)

Obwohl das batteriebetriebene Fahrzeug (BEV) erst in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen hat, wurde es dennoch wie der Ottomotor im 19. Jahrhundert entwickelt. Bereits 1882 wurde von Werner Siemens (1816–1892) sein elektrischer Kutschenwagen in Berlin vorgestellt. Nur 8 Jahre später präsentierte der damals erst 25-jährige Ferdinand Porsche (1875–1951) auf der Weltausstellung in Paris das erste fahrtaugliche Elektrofahrzeug der Welt. Mit zwei Radnabenmotoren an den Vorderrädern montiert und einen 400 kg schweren Blei-Akku konnte man mit diesem Fahrzeug eine Reichweite von damals schon beachtlichen 50 Kilometer mit 50 km/h zurücklegen (Karle, 2017).

Trotz ständiger Entwicklungsversuche dieser Fahrzeugtechnologie im 20. Jahrhundert, konnte sich das batteriebetriebene Fahrzeug nicht durchsetzen. Dies lag daran, dass die damals verfügbaren Akkumulatoren nur bedingt den Anforderungen eines Kfz-Betriebes genügten. Mit der Erfindung des Lithium-Ionen-Akkus gegen Ende des 20. Jahrhunderts wurde jedoch ein Meilenstein für diese Antriebstechnologie gelegt (Karle, 2017).

Funktionsaufbau eines batteriebetriebenen Fahrzeuges

Die Technik eines batteriebetriebenen Fahrzeuges besteht lediglich aus drei Komponenten: der Batterie mitsamt Batteriemanagementsystem, der Leistungselektronik und dem Elektromotor (von Hohnhorst, 2018).

Die Funktion des Elektromotors ist es, elektrische Energie in mechanische Antriebsenergie umzuwandeln (Karle, 2017). Um diese Arbeit verrichten zu können, wird der dafür benötigte Strom über einen Wechselrichter in Gleichstrom umgewandelt und in die Batterie geladen. Die Energie für Nebenverbraucher wie Lenk- oder Bremsunterstützung wird ebenfalls von derselben Batterie entnommen (Kreyenberg, 2016).

Neben dem motorischen Betrieb des Elektromotors kann dieser beim Bremsen des Fahrzeuges elektronisch in den Generatorbetrieb geschaltet werden. Die entstehende Bremsenergie kann wieder für die Aufladung des Akkumulators genutzt werden, dessen Prozess man als „Rekuperation“ bezeichnet (Karle, 2017).

2.1.3 Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge (FCEV)

Ein brennstoffzellenbetriebenes Fahrzeug (FCEV) gehört wie auch das batteriebetriebene Fahrzeug zu der Kategorie „Elektrofahrzeug“.

Auch die Technologie des brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeuges fand ihren Ursprung im 19. Jahrhundert. Erfunden wurde die Brennstoffzelle vom britischen Physiker und Jurist Sir William Grove (1811–1896), der herausfand, dass sich der Prozess der Elektrolyse, bei der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird, auch umkehren lässt. 1839 präsentierte er dann die „galvanische Gasbatterie“, die durch die „kalte Verbrennung“ von Wasserstoff und Sauerstoff Strom erzeugte. Aufgrund der geringen messbaren Spannungen und Stromflusses konnte sich die Brennstoffzelle jedoch nicht gegen Erfindungen wie dem Verbrennungsmotor durchsetzen (Simons und Franken, 2018).

Nach langer Vergessenheit wurde die Brennstoffzelle gegen Ende des 20. Jahrhunderts als Hoffnungsträger für abgasfreie Fahrzeuge oder für Hausbesitzer als eigene Stromproduzenten gehandelt. Die heute noch immer recht hohen technischen Anforderungen und Kosten verhindern jedoch den massenhaften Einsatz von Brennstoffzellen (Simons und Franken, 2018).

Funktion eines brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeuges

Wie oben bereits erwähnt ist das brennstoffzellenbetriebene Fahrzeug ein Elektrofahrzeug, welches mit Strom angetrieben wird. Der Unterschied zu batteriebetriebenen Fahrzeugen liegt jedoch darin, dass der benötigte Strom für den Antrieb an Bord des Fahrzeuges selbst hergestellt wird, und zwar mit Hilfe einer Brennstoffzelle und dem im Tank mitgeführten Wasserstoff (Skarics, 2018).

Zum Einsatz kommen ausschließlich Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (PEMFC), welche durch eine kontrollierte Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff die für den Antrieb notwendige elektrische Energie erzeugen. Das dabei entstehende „Abgas“ ist lediglich Wasserdampf (Ehret, 2018).

Wie die genaue Reaktion in einer Brennstoffzelle abläuft, wird in Abbildung 11 dargestellt. Im ersten Schritt wird bei einer Brennstoffzelle an der Anoden-Seite Wasserstoff und an der Kathoden-Seite Umgebungsluft eingeleitet. Der molekulare Wasserstoff (H_2) wird an der Anoden-Seite in Wasserstoffkerne (H^+) und Elektronen aufgespalten. Im zweiten Schritt wandern die H^+ -Ionen durch die Elektrolytmembran, welche nur für die Wasserstoffkerne durchlässig ist, auf die Seite des Sauerstoffs. Die Elektronen gelangen aufgrund eines elektrischen Leiters von der Anode zur Kathode. Der so entstehende Stromfluss kann nun für den Antrieb des Elektromotors genutzt werden. Sauerstoff, Elektronen und H^+ -Ionen verbinden sich auf der Kathoden-Seite zu H_2O , also Wasser (siehe Schritt 3) (Ehret, 2018).

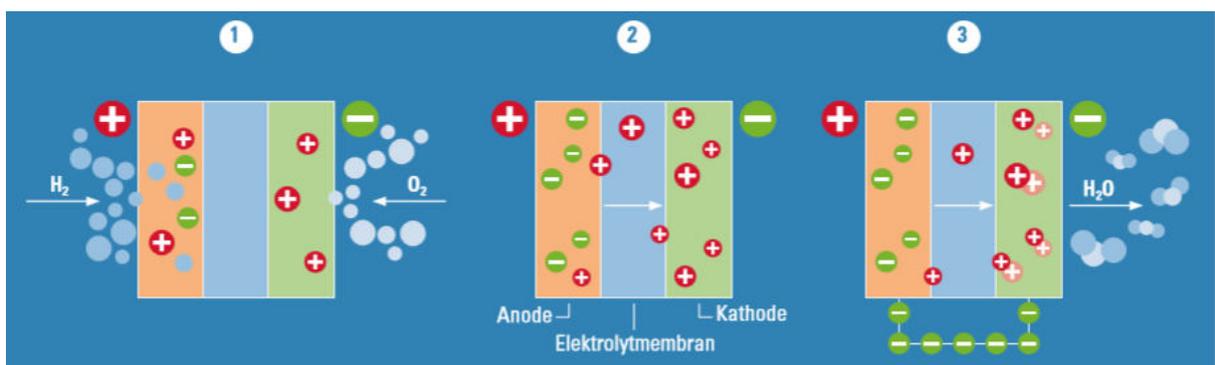


Abbildung 11: Reaktion in einer Brennstoffzelle (Ehret, 2018)

Grundsätzlich wird der Wasserstoff gasförmig und bei Drücken von bis zu 700 bar in Druckbehältern mitgeführt, während man den Sauerstoff von der Umgebungsluft entnimmt. Der bereits oben erwähnte Elektromotor wandelt, wie auch beim

batteriebetriebenen Fahrzeug, die zugeführte elektrische Energie wiederum in mechanische Antriebsenergie um. Anderweitig kann der hergestellte Strom in bestimmten Fahrsituationen auch in eine Pufferbatterie gespeist werden und in den jeweiligen Situationen an den Motor abgegeben werden. Weitere Komponenten eines FCEV-Antriebsstrangs sind unter anderem Leistungselektronik und Komponenten zur Rückgewinnung von Bremsenergie (Ehret, 2018). Aufgrund des Antriebsstrangaufbaues stellen Brennstoffzellenfahrzeuge sogenannte „Elektro-Wasserstoff-Hybride“ dar (Klell, et al., 2018).

In welchem Ausmaß die oben genannten Antriebstechnologien in der Praxis Anwendung finden, wird im folgenden Kapitel erläutert.

2.2 Fahrzeugstatistik

Sieht man sich den Fahrzeugbestand in Europa an, merkt man, dass deutlich mehr Fahrzeuge unterwegs sind als noch vor einigen Jahren. Alleine die PKW-Flotte in der EU wuchs zwischen 2012 und 2017 um etwa 4,5 % auf 252 Mio. Fahrzeuge, was einen Zuwachs in absoluten Zahlen von rund 11 Mio. PKWs bedeutet. Würde man noch Transporter, LKWs und Busse dazurechnen, wäre man bei rund 290 Mio. Fahrzeugen in der EU (Focus Online, 2017).

Mit welcher Antriebstechnologie diese Fahrzeuge unterwegs sind, ist in Abbildung 12 sichtbar. Deutlich zu erkennen ist, dass konventionell betriebene Fahrzeuge, also all jene die mit Diesel und Benzin betrieben werden, noch immer den Hauptanteil des europäischen Fahrzeugbestandes ausmachen. Eine Ausnahme stellt die Türkei dar, jedoch ist anzumerken, dass bei „Alternative Energie“ nicht nur Batterie- und Brennstoffzellenantrieb, sondern auch weitere Antriebsarten wie Biotreibstoffe oder Gas inkludiert sind. Batterie- und brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge machen also nur einen geringen Anteil in den einzelnen europäischen Ländern aus (Eurostat, 2019).

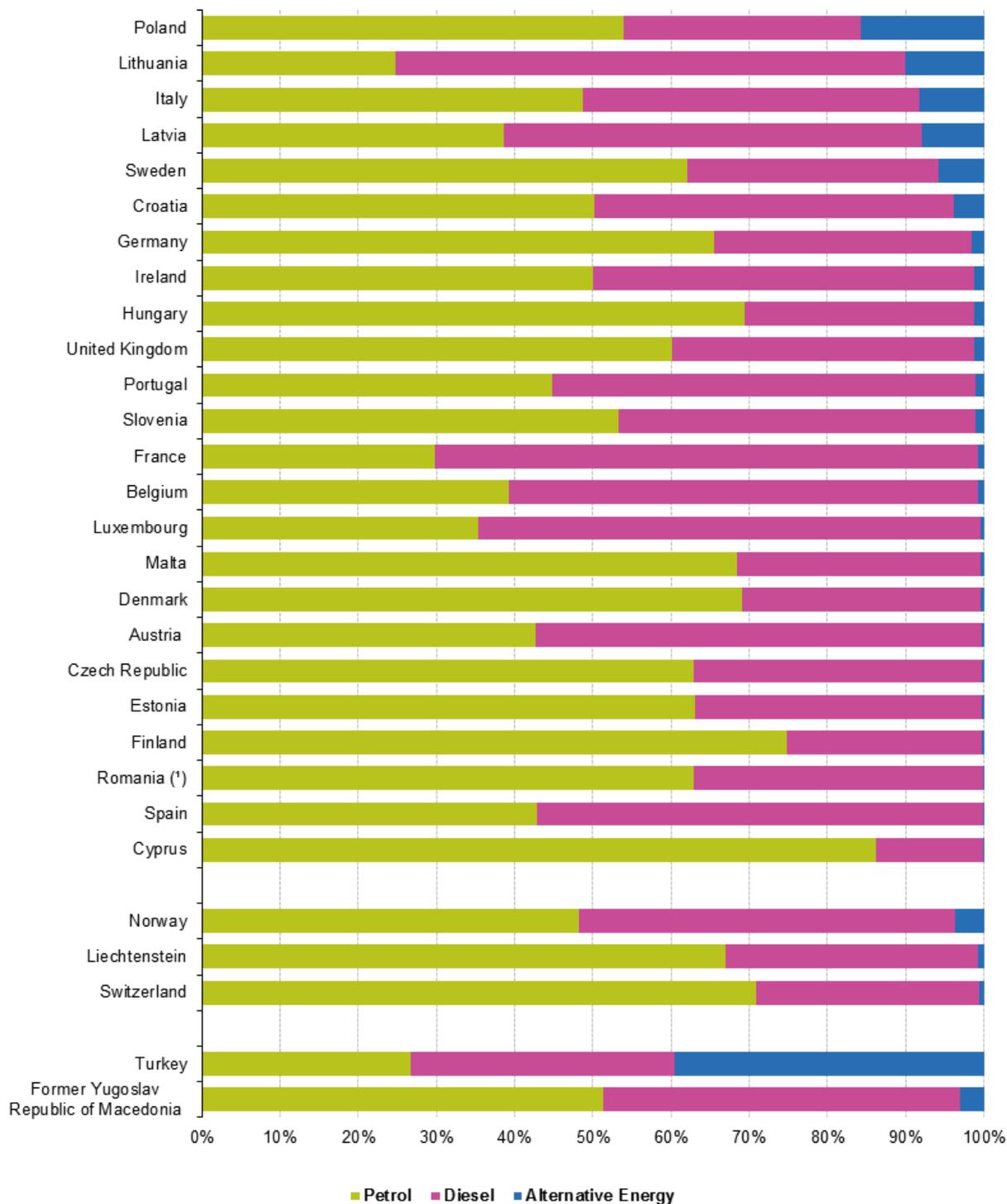


Abbildung 12: Europäischer Fahrzeugbestand nach Kraftstoffarten im Jahr 2016 in Prozent (Eurostat, 2019); [Anm.: (1) Daten vom Jahr 2015; Keine Daten vorhanden von Bulgarien, Griechenland, Niederlande, Slowakei und Island]

Wie nun das genaue Verhältnis zwischen konventionell, batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen aussieht, soll am Beispiel Österreich demonstriert werden. Schon bei der Betrachtung von Abbildung 12 ist zu erkennen, dass auch in Österreich benzin- und dieselpetriebene Fahrzeuge die dominantere Fahrzeugflotte darstellen. Auffallend ist jedoch, dass im Vergleich zu den meisten

europäischen Ländern der Bestand der dieselbetriebenen gegenüber benzinbetriebenen Fahrzeugen deutlich höher ist (Eurostat, 2019).

Betrachtet man nun den Bestand bzw. die Neuzulassung der jeweiligen Antriebstechnologien, merkt man deutlich, dass es hier große Unterschiede zwischen konventionell, batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen gibt. Allein im Jahr 2018 betrug der Bestand von benzinbetriebenen Fahrzeugen 2.133.470 PKWs wovon 184.150 neu zugelassen wurden. Etwas mehr machte der Bestand von dieselbetriebenen Fahrzeugen aus (2.776.332 PKWs). Neuzugelassen wurden davon 140.111 PKWs. Der Bestand von batteriebetriebenen Fahrzeugen belief sich im selben Jahr hingegen nur auf 20.831 PKWs, wovon 6.757 der Neuzulassung zugerechnet werden konnten. Bei brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen fiel der Bestand bzw. die Neuzulassung noch dürftiger aus. So zählte man im Jahr 2018 lediglich 24 PKWs wovon 7 neu zugelassen wurden (Statistik Austria, 2018).

Abbildung 13 zeigt den prozentuellen Bestand bzw. Neuzulassung im Jahr 2018 der jeweiligen Antriebstechnologie. Deutlich zu erkennen ist dabei der gewaltige Unterschied zwischen den konventionellen und den alternativen Antriebssystemen.

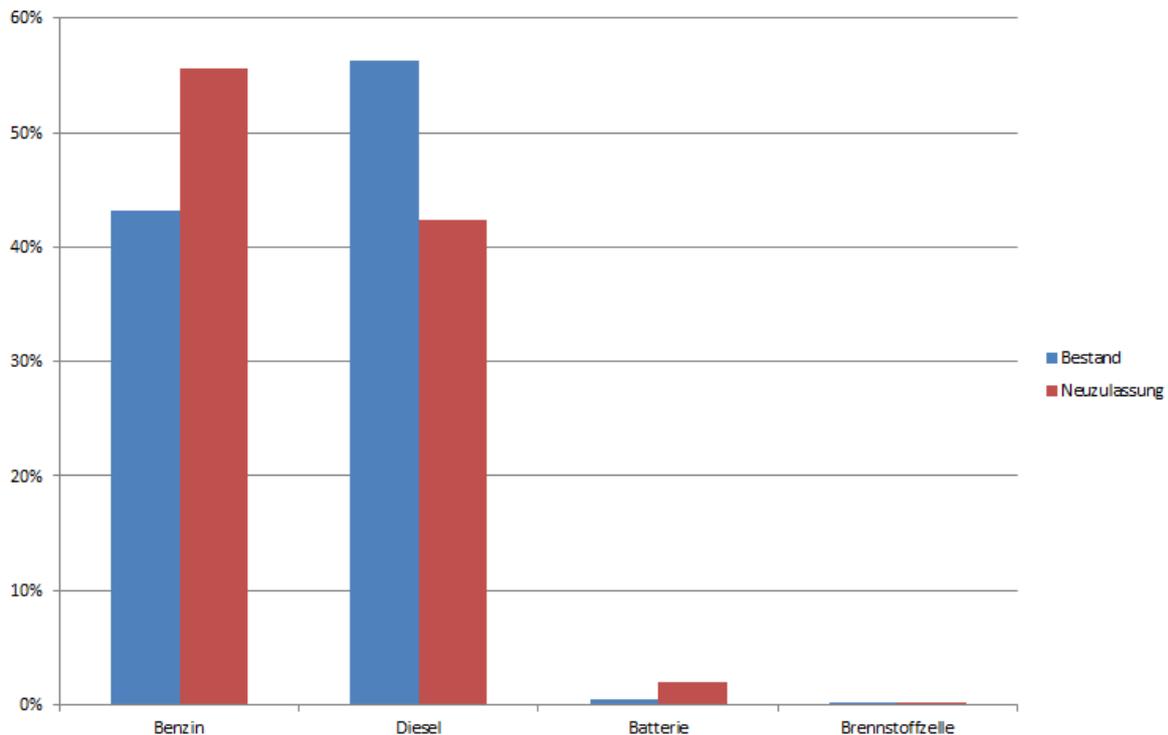


Abbildung 13: Prozentueller Bestand und Neuzulassung von konventionellen, batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen in Österreich im Jahr 2018 (Statistik Austria, 2018)

Basierend auf den oben dargestellten Daten werden konventionell betriebene Fahrzeuge zukünftig weiterhin eine vorherrschende Rolle auf der Straße spielen. Im Falle Österreichs fällt diese Rolle derzeit dieselbetriebenen Fahrzeugen zu. Batterie- und brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge werden ohne technische Weiterentwicklung oder zusätzliche Förderungen weiterhin eine Minderheit auf der Straße darstellen.

2.3 Externe Einflussfaktoren auf konventionelle und alternative Antriebstechnologien

Damit man die Umweltfreundlichkeit der verschiedenen Antriebstechnologien bewerten kann, reicht es natürlich nicht aus, sich nur auf die reine Fahrzeugtechnologie zu beschränken. Würde man sich darauf reduzieren, wären Elektrofahrzeuge die klaren Sieger. Jedoch spielen externe Faktoren wie das Mobilitätsverhalten, die Fahrzeugherstellung oder die Energiegewinnung und -bereitstellung für die Nutzung der Fahrzeuge bezüglich ihrer Umweltfreundlichkeit eine große Rolle. Diese externen Einflussfaktoren werden in diesem Kapitel genauer betrachtet.

2.3.1 Mobilitätsverhalten in Europa

Wie eingangs schon erwähnt ist Mobilität ein wichtiger Faktor in unserem Leben. Gründe dafür sind unter anderem die Arbeit, dienstliche bzw. geschäftliche Wege, Schule bzw. Ausbildung, Bringen oder Holen bzw. Begleitung von Personen, Einkauf, private Erledigung, sonstige Freizeit oder privater Besuch. Mit der Ausnahme des Wegzwecks „Bildung“, in dessen Bereich hauptsächlich der ÖV genutzt wird, werden alle anderen Mobilitätsgründe vom MIV dominiert (BMVIT, 2016). Die Dominanz dieses Verkehrsmittels wird nochmal deutlich, wenn man sich die zurückgelegten Personenkilometer im Jahr in der EU ansieht. Allein mit dem Auto werden im jährlichen Durchschnitt 8.584 km pro EU-Bürger zurückgelegt. Im Einzelnen betrachtet ist Frankreich mit 12.800 km pro Jahr und Person das EU-Land, in dem am meisten Auto gefahren wird. Italien ist mit seinen 10.950 km/Jahr/Person ebenfalls weit vorne dabei und auch Österreich liegt mit 8.820 km/Jahr/Person knapp über dem EU-Durchschnitt. Etwas weniger als in Österreich wird unter anderem in Polen gefahren. Mit 8.130 km pro Jahr und Person liegt man knapp unter dem

EU-Durchschnitt. Rumänien belegt mit 3.520 km/Jahr/Person das Schlusslicht im EU-Vergleich (VCÖ, 2014).

Dass das Auto im Vergleich zu früher immer öfter genutzt wird, kann auch gut anhand von Österreich gezeigt werden. Kam man hier im gesamten Land im Jahr 1990 noch auf 55,7 Mrd. Personenkilometer, betragen die mit dem Auto gefahrenen Kilometer im Jahr 2015 schon etwa 77,5 Milliarden. Innerhalb von 25 Jahren kam es somit zu einer Steigerung von 40 % an gefahrenen Kilometern (VCÖ, 2016).

Trotz des allgemeinen Anstieges der gefahrenen Personenkilometer über die Jahre ist es jedoch aus umweltrelevanter Sicht von Bedeutung, in welcher Intensität das Fahrzeug genutzt wird. Sieht man sich alltägliche Autofahrten im Vergleich an, merkt man, dass der Trend heutzutage zu kilometermäßig kurzen Strecken hingeht. Deutlich zu sehen ist dies auch in Abbildung 14. Diejenigen Autofahrten, die eine Distanz von mehr als 20 bzw. 50 Kilometer ausmachen, stellen vergleichsweise eine kleinere Gruppe dar (VCÖ, 2017a).

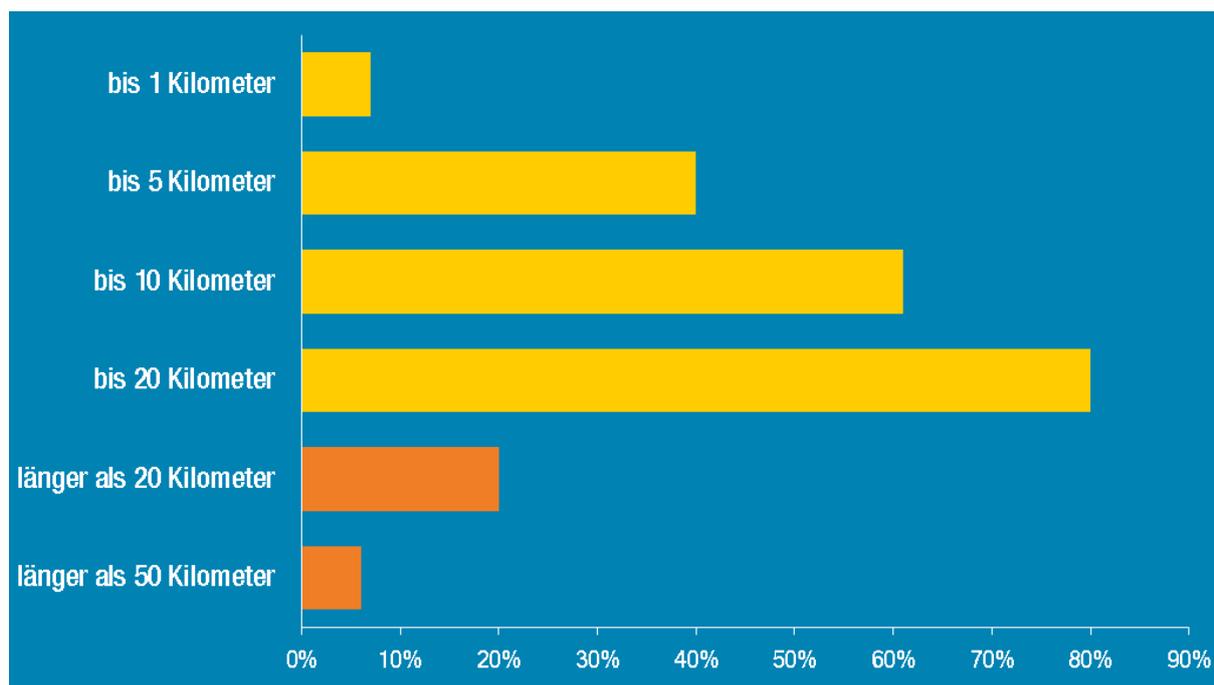


Abbildung 14: Weglänge pro Autofahrt der Österreicherinnen und Österreicher (VCÖ, 2017a)

Abhängig von der Nutzungsintensität eines Fahrzeuges kann im Folgenden eine entsprechende Fahrleistung abgeleitet werden. Eine Person, deren Alltagsweg nur wenige Kilometer beträgt, erreicht somit eine deutlich geringere jährliche Fahrleistung, als jene, deren alltäglichen Autofahrten eine Strecke von mehr als

50 Kilometer ausmachen. In Abhängigkeit der verwendeten Antriebstechnologie, kann dies in beiden Fällen sowohl positive als auch negative Folgen für die Umwelt haben.

2.3.2 Energiegewinnung in ausgewählten Ländern

Ein weiterer Punkt für die Beurteilung der Umweltfreundlichkeit von Antriebstechnologien stellt die Energiebereitstellung für die unterschiedlichen Fahrzeugtechnologien dar. Somit ist es ausschlaggebend welche Energieträger für die Stromgewinnung verwendet werden, da dieser Strom unter anderem für die Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung zum Einsatz kommt. An den Beispielen Österreich, Polen und Italien soll die genaue Stromproduktion sowie die damit einhergehende Emissionsentstehung aufgezeigt werden.

2.3.2.1 Österreich

Die Stromproduktion in Österreich wird zu einem gewissen Grad durch eine günstige topographische Situation geprägt. Insgesamt wurden im Jahr 2016 68.351 GWh Strom produziert. Betrachtet man nun Abbildung 15 genauer, fällt einem sofort ein Energieträger ins Auge, und zwar die Wasserkraft. Allein 62,8 % der gesamten Stromproduktion im Jahr 2016 wurde durch die Wasserkraft produziert, was einem absoluten Wert von 42.919 GWh entspricht. Neben diesem Hauptenergieträger wurde der weitere Anteil der gesamten Stromproduktion von Kohle mit 3.966 GWh, Öl mit 993 GWh, Gas mit 8.591 GWh, Biobrennstoffe mit 4.332 GWh, Abfall mit 1.204 GWh, Solar PV mit 1.096 GWh, Wind mit 5.235 GWh und sonstigen Quellen mit 15 GWh abgedeckt (IEA, 2018).

Bei genauer Betrachtung der einzelnen oben genannten Energieträger, merkt man, dass ein Großteil der österreichischen Stromproduktion von erneuerbaren Quellen gedeckt wird. Schon im Jahr 1990 dominierte der Anteil der Erneuerbaren dank Wasserkraft den Anteil der fossilen Energieträger deutlich. Zählte man bei der Stromproduktion einen Anteil an fossilen Energieträgern von etwa 33,1 %, betrug der Anteil an Erneuerbaren etwa 66,9 %. Aufgrund der Weiterentwicklung von bestehenden bzw. neu installierten erneuerbaren Energieträgern, wie zum Beispiel Wind- und Solar PV-Anlagen, wurde die Differenz zwischen fossilen und regenerativen Energiequellen am Stromproduktionsanteil weiterhin vergrößert. So

stieg der Anteil der Erneuerbaren im Jahr 2016 auf 78,3 %, wobei der Anteil der fossilen Energieträger auf 21,7 % sank (IEA, 2018).

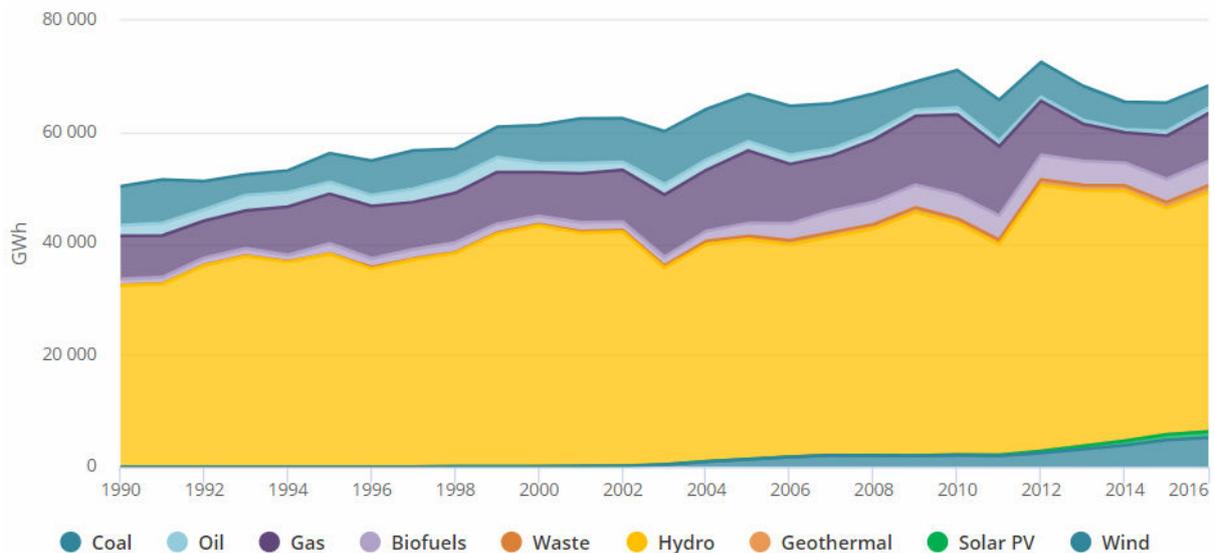


Abbildung 15: Stromproduktion durch verschiedene Energieträger zwischen 1990 und 2016 in Österreich (IEA, 2018)

Obwohl man aufgrund von erneuerbaren Energieträgern Emissionen einsparen kann, ist die Stromerzeugung jedoch nicht zur Gänze emissionsfrei. Je nachdem welcher Energieträger Einsatz bei der Stromproduktion findet, desto mehr oder weniger Emissionen werden freigesetzt. Ausschlaggebend für die Höhe des Emissionsausstoßes sind unter anderem die Zusammensetzung des Kraftwerkparkes, die eingesetzten Brennstoffe und die erzeugten Strommengen (Kranzl et al., 2018). Die durch die österreichische Stromproduktion emittierten CO₂-Emissionen sind, wie in Abbildung 16 gut zu sehen, deutlich rückläufig. Wurde etwa 1990 noch 241,9 g CO₂/kWh emittiert, schaffte man es die Emissionen im Jahr 2016 auf bis zu 85,1 g CO₂/kWh zu reduzieren (EEA, 2019).

Allgemein betrachtet ist es über den Zeitabschnitt immer wieder zu einer Erhöhung und Verminderung der CO₂-Emittierung gekommen. Dennoch ist eine deutliche Abwärtsbewegung zwischen 1990 und 2016 zu erkennen, was auf den Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern und auf die verbesserte Umwandlungseffizienz in der Stromproduktion zurückzuführen ist (EEA, 2019).

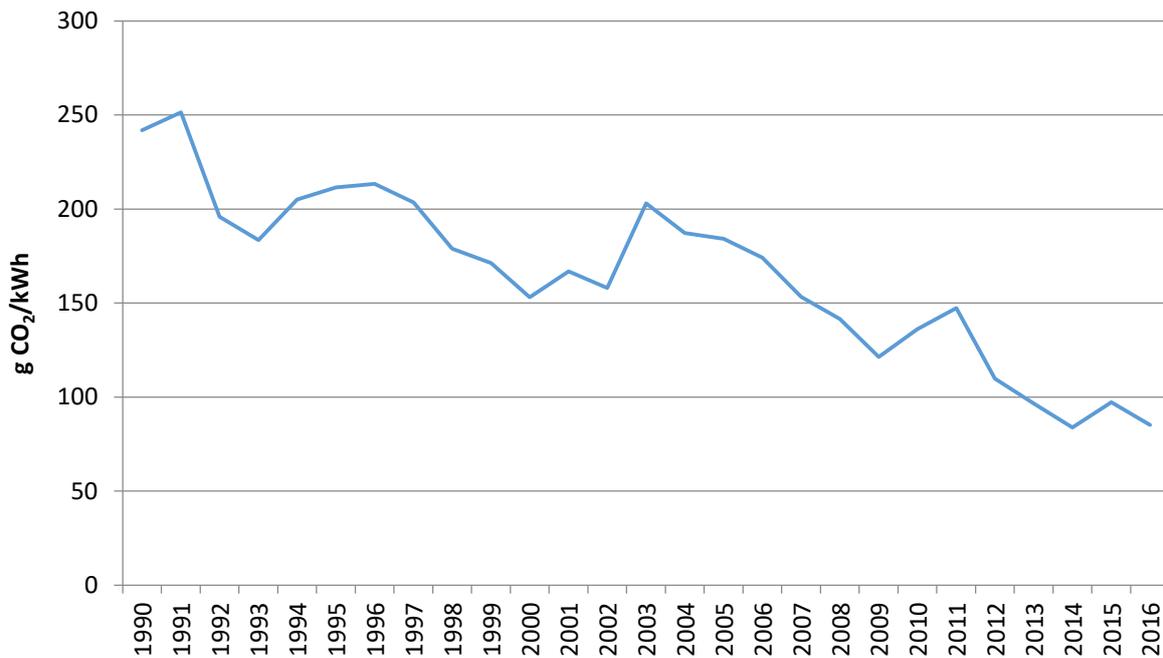


Abbildung 16: CO₂-Emissionsintensität der Stromerzeugung zwischen 1990 und 2016 in Österreich (EEA, 2019)

Es ist jedoch anzumerken, dass es aufgrund von Energieproduktionsüberschüssen bzw. -mängeln zu Exporten oder Importen von Strom aus anderen Ländern kommen kann. Mit welchen Energieträgern der exportierte bzw. importierte Strom hergestellt wurde, ist jedoch ausschlaggebend, wie sauber der Strom ist, der im Folgenden den Energiebedarf des Importlandes abdecken soll. Es ergibt sich somit ein Strom-Mix der sich deutlich von der Stromproduktion im eigenen Land unterscheidet und in Verbindung damit auch das Emissionsbild. Auch in Österreich ist diese Vorgehensweise üblich, wodurch sich ein Energie-Mix mit einer CO₂-Intensität von 334 g CO₂-eq/kWh ergibt (Moro und Lonza, 2018). Da in der Literatur zu meist der CO₂-äquivalente Wert für die Bewertung der Klimarelevanz verschiedener Energiesysteme verwendet wird, ist auch hier dieser Wert herangezogen worden.

Wo und in welcher Menge nun der erzeugte Strom Einsatz findet, kann mittels des energetischen Endverbrauchs dargestellt werden. Hierbei wird diejenige Energie betrachtet, welche zu den Endverbrauchern gelangt, jedoch ohne Einbezug derjenigen Energie, die von der Energiewirtschaft selbst verbraucht wird, zum Beispiel bei Umwandlungsprozessen oder Energielieferungen. Es wird also der Gesamtenergieverbrauch der Endnutzer dargestellt (Eurostat, 2018a).

Unter Endverbraucher versteht man grundsätzlich fünf Sektoren, welche sich in produzierende Bereiche bzw. Industrie, Verkehr, private Haushalte, Dienstleistungen und Landwirtschaft aufteilen lassen. Insgesamt belief sich der energetische Endverbrauch aller fünf Sektoren im Jahr 2016 auf einen Wert von 327.128,64 GWh. Bei genauerer Betrachtung von Abbildung 17 merkt man, dass allein die Sektoren Industrie und Verkehr für etwa zwei Drittel des gesamten Verbrauches verantwortlich waren. Demzufolge fallen 33,58 % des energetischen Endverbrauches auf den Industriesektor und 32,66 % auf den Verkehrssektor. Die anderen drei Sektoren schlagen sich mit insgesamt 33,76 % zu Buche (Eurostat, 2018b).

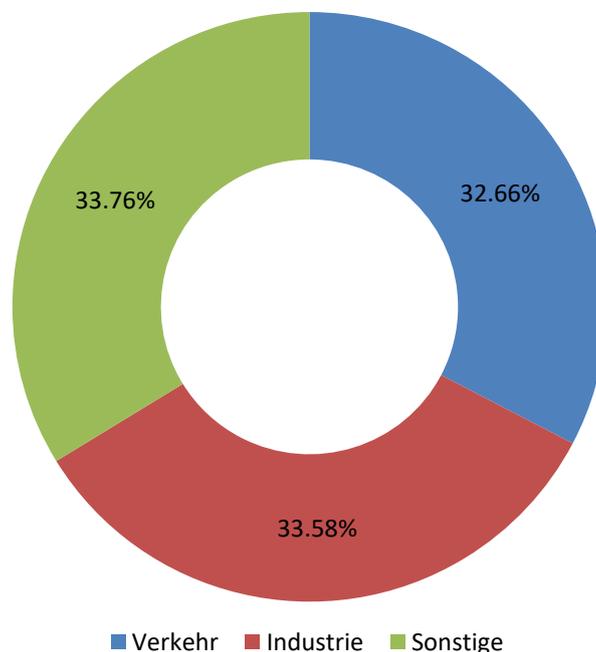


Abbildung 17: Energetischer Endverbrauch von Österreich im Jahr 2016 nach Sektoren in Prozent (Eurostat, 2018b)

Um zu verstehen, wie der energetische Endverbrauch des Verkehrssektors zu Stande kommt, muss man dessen Bestandteile genauer charakterisieren. Grundsätzlich zählen der Straßenverkehr, der Bahnverkehr, der internationale und nationale Luftverkehr, der Binnenschiffverkehr, der Rohrleitungstransport und sonstige Transporte dazu. Gemeinsam wurde im Jahr 2016 eine Energie von 106.844,81 GWh verbraucht. Auffallend ist jedoch, dass der Straßenverkehr im Verbrauch alle anderen dominierte. Im selben Jahr betrug der energetische Endverbrauch des Straßenverkehrs 91.190,83 GWh, was somit 85 % des gesamten Verkehrssektors ausmachte (Eurostat, 2018b).

Betrachtet man nun auch noch die Energieträger, welche im Straßenverkehr verbraucht werden, wird schnell klar, dass der Verkehr fossil ausgelegt ist. Allein der Anteil an Erdöl bzw. Erdölprodukte, der verbraucht wurde, betrug 84.817,59 GWh, wodurch nur dadurch 93 % des gesamten energetischen Endverbrauches des Straßenverkehrs gedeckt wurden. Die restlichen 7 % teilten sich Gas mit 197,71 GWh, erneuerbare Energie mit 6.163,90 GWh (wo jedoch angemerkt werden muss, dass hier auch feste und flüssige Biokraftstoffe sowie Holzkohle hinzugezählt werden) und Strom mit 11,63 GWh (Eurostat, 2018b).

2.3.2.2 Polen

Der Energiesektor von Polen wird von einem ganz bestimmten Energieträger dominiert, und zwar der Kohle. Genauer gesagt ist der Sektor von Stein- und Braunkohle geprägt (RAP, 2018).

Insgesamt wurde in Polen im Jahr 2016 eine Strommenge von 166.635 GWh produziert, wovon allein 132.933 GWh aus Kohle stammten. Dies bedeutet, dass der Energieträger Kohle in diesem Jahr für 79,8 % der gesamten Stromproduktion verantwortlich war. Neben diesem Hauptenergiebringer wurden die verbleibenden 20,2 % von Öl mit 2.302 GWh, Gas mit 7.831 GWh, Biobrennstoffe mit 7.943 GWh, Abfall mit 225 GWh, Wasserkraft mit 2.622 GWh, Solar PV mit 124 GWh, Wind mit 12.588 GWh und sonstigen Quellen mit 67 GWh produziert (IEA, 2018).

Betrachtet man nun die einzelnen oben erwähnten Energieträger bzw. in welchem Ausmaß sie in der Stromproduktion zum Einsatz kommen, wird schnell klar, dass in Polen ein fossiler Energiesektor vorherrschend ist und auch in der Vergangenheit schon immer fossil war (siehe Abbildung 18). Zeigen kann man dies, wenn man sich das Verhältnis von fossiler und erneuerbarer Energie in der Stromproduktion ansieht. Im Jahr 1990 wurde der Strom fast zur Gänze aus fossilen Brennstoffen erzeugt. So kam man hier zu einem Anteil von 97,5 %, was auf einen ernüchternden Anteil von 2,5 % von erneuerbaren Energieträgern schließen lässt. Auch heutzutage hat sich das Verhältnis in der Stromproduktion nicht allzu sehr verändert. Reduzierte sich der Anteil an fossilen Energieträgern im Jahr 2016 auf 86 %, erreichte man im Bereich der erneuerbaren Energieträger eine Steigerung von 11,5 % gegenüber 1990 (IEA, 2018).

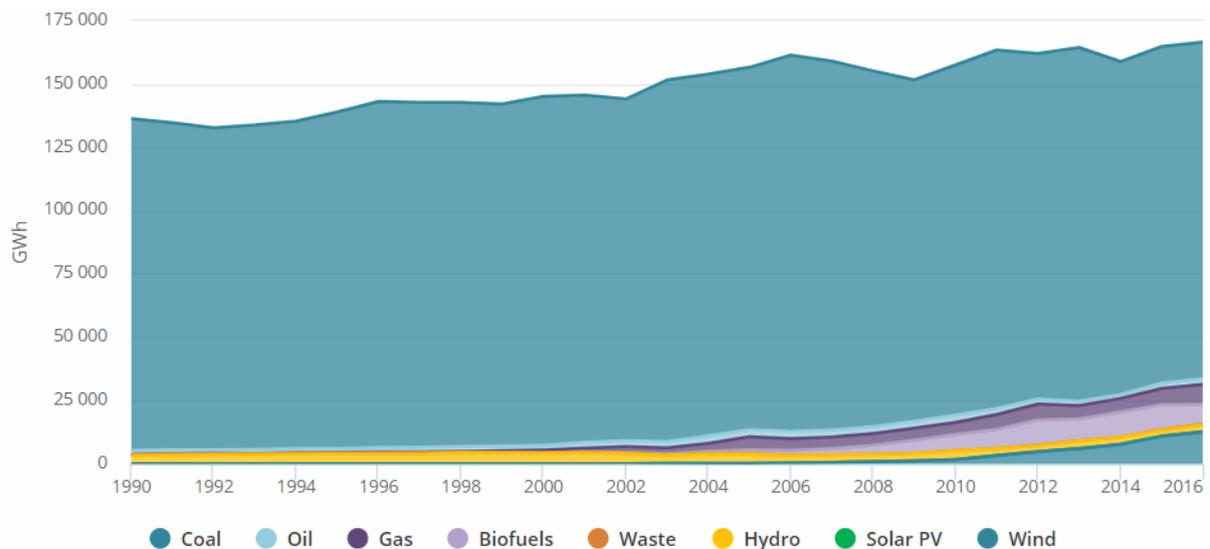


Abbildung 18: Stromproduktion durch verschiedene Energieträger zwischen 1990 und 2016 in Polen (IEA, 2018)

Wie schon im Beispiel Österreich beschrieben, hängt die Emissionsentstehung bei der Stromerzeugung von den jeweiligen Energieträgern ab, die bei der Produktion Einsatz finden. Da in Polen die Kohle schon früher und auch heute noch immer der Hauptenergiebringer im Energiesektor ist, wurde auch über die Zeit eine dementsprechend hohe Emissionsrate freigesetzt. Dies wird auch deutlich bei Betrachtung von Abbildung 19. Es ist zwar über die Jahre ein Rückgang der CO₂-Emissionen zu sehen, jedoch findet die Reduktion eher langsam statt. Trotzdem schaffte man es im Vergleich zu 1990, in dessen Jahr man noch 1.235,6 g CO₂/kWh ausstieß, einen Rückgang auf 773,3 g CO₂/kWh im Jahr 2016 zu erzielen (EEA, 2019).

Ungeachtet der Reduzierung von CO₂-Emissionen zwischen 1990 und 2016 bildet Polen mit Zypern, Malta und Estland bei der Betrachtung des CO₂-Ausstoßes in der Stromproduktion das Schlusslicht im Vergleich zu anderen europäischen Ländern. Einzig und allein Estland schnitt mit 821 g CO₂/kWh im Jahr 2016 noch schlechter ab als Polen. Zurückzuführen ist dies auf die kohlenstoffintensiven Energieträger, den geringen Anteil an erneuerbare Energie und der begrenzten bzw. fehlenden nuklearen Energiequelle in deren nationalen Stromerzeugungsmix (EEA, 2019).

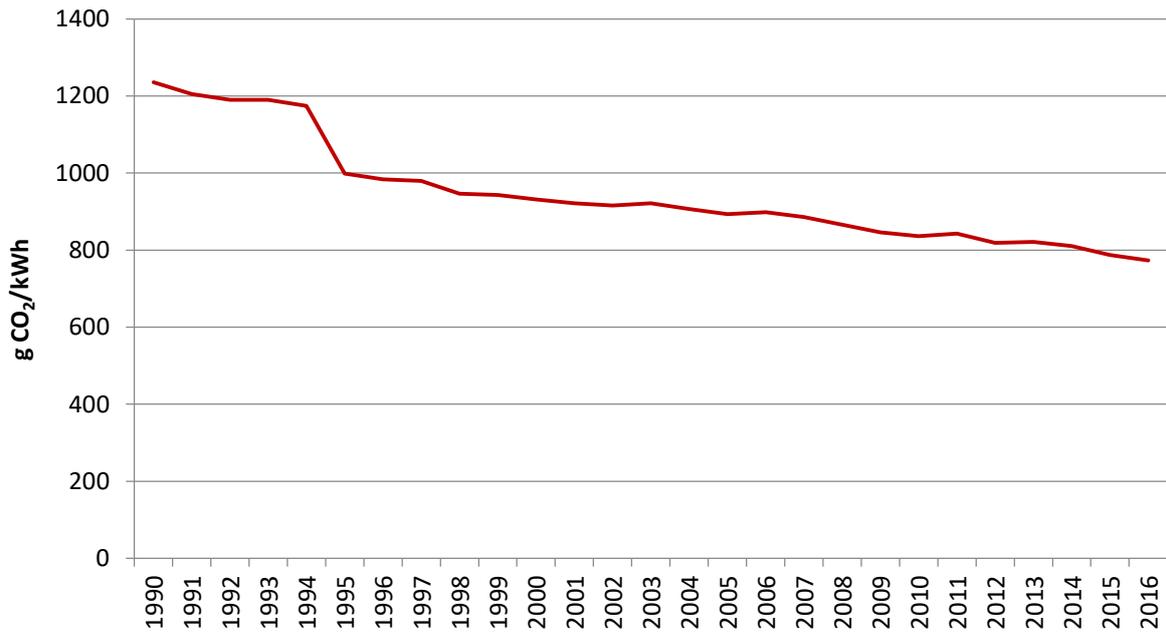


Abbildung 19: CO₂-Emissionsintensität der Stromerzeugung zwischen 1990 und 2016 in Polen (EEA, 2019)

Ähnlich wie in Österreich findet jedoch auch in Polen ein Energiehandel mit dem Ausland statt. Dadurch kommt es auch hier zu einem dem nationalen Stromerzeugungsmix unterschiedlichen Energie-Mix, der schlussendlich wieder den Energiebedarf des Landes decken soll. Der durch den Handel neu entstandene Strom-Mix verändert jedoch wiederum das Emissionsbild der Stromerzeugung, wodurch man in Polen einen Energie-Mix mit einer CO₂-Intensität von 980 g CO₂-eq/kWh erhält (Moro und Lonza, 2018).

Wie nun der erzeugte Strom eingesetzt wird, kann wiederum mit dem energetischen Endverbrauch, aufgeteilt in Sektoren, gezeigt werden. Dass es hier deutliche Unterschiede im Vergleich zu Österreich gibt, ist in Abbildung 20 gut ersichtlich. Dominierten dort nämlich die Sektoren Verkehr und Industrie, splitten sich die Sektoren in Polen doch etwas anders auf. Grundsätzlich wurde von allen fünf Sektoren im Jahr 2016 eine Strommenge von 775.162,76 GWh verbraucht. Davon fallen etwa 28,87 % auf den Verkehrssektor, 23,44 % auf den Industriesektor und 47,70 % auf die Sektoren private Haushalte, Dienstleistungen und Landwirtschaft, wobei die privaten Haushalte den größten Anteil in dieser Gruppe darstellen (Eurostat, 2018b).

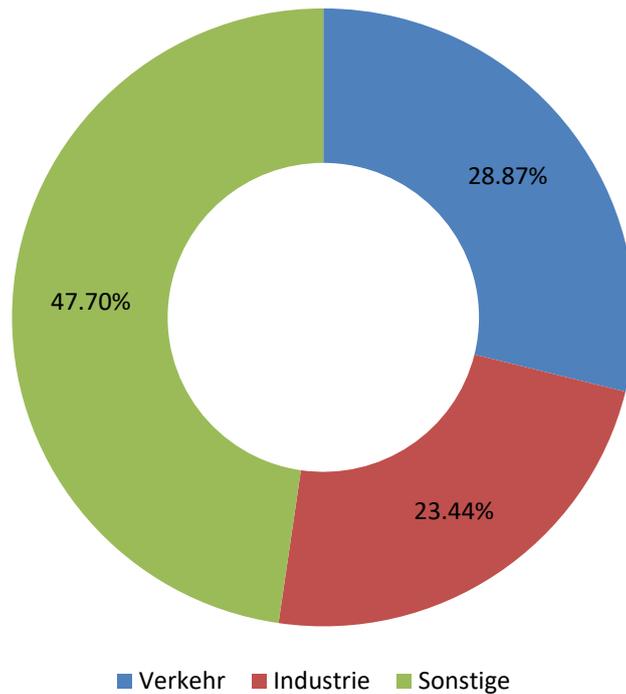


Abbildung 20: Energetischer Endverbrauch von Polen im Jahr 2016 nach Sektoren in Prozent (Eurostat, 2018b)

Wie auch im Beispiel Österreich setzt sich der energetische Endverbrauch des Verkehrssektors auch hier aus dem Straßenverkehr, dem Bahnverkehr, dem internationalen und nationalen Luftverkehr, dem Binnenschiffverkehr, dem Rohrleitungstransport und der sonstigen Transporte zusammen. Insgesamt belief sich der Verbrauch an Energie im Jahr 2016 in diesem Sektor auf 223.761,20 GWh. Bei Betrachtung der einzelnen Transportkategorien merkt man, dass auch in Polen der Straßenverkehr den größten Verbrauch von allen aufweist. 206.979,11 GWh betrug der energetische Endverbrauch des Straßenverkehrs, der somit 92,5 % des gesamten Verkehrssektors ausmacht (Eurostat, 2018b).

Aufgrund der im Straßenverkehr eingesetzten bzw. verbrauchten Energieträger lässt sich auch in Polen darauf schließen, dass dieser Bereich des Verkehrssektors fossil geprägt ist. Allein der Verbrauch von Erdöl bzw. Erdölprodukten betrug im Jahr 2016 201.454,86 GWh, wodurch etwa 97 % des energetischen Endverbrauches des Straßenverkehrs abdeckt wurden. Die übrigen 3 % wurden durch Gas mit 174,45 GWh, erneuerbare Energie mit 5.314,91 GWh (wo ebenfalls feste und flüssige Biokraftstoffe sowie Holzkohle hinzuzählen) und Strom mit 23,26 GWh abgedeckt (Eurostat, 2018b).

2.3.2.3 Italien

In Italien gestaltete sich der Energiesektor über die Jahre etwas abwechslungsreicher als in den oben genannten Ländern. Wird die Stromproduktion in Österreich oder in Polen über die Zeit von einem bestimmten Energieträger dominiert, stellt man in Italien genau das Gegenteil fest (siehe Abbildung 21). Wurde der Strom in den 1990er Jahren hauptsächlich durch Öl hergestellt, sticht heutzutage der Energieträger Gas hervor (IEA, 2018).

Insgesamt belief sich die Stromproduktion im Jahr 2016 auf 289.768 GWh, wovon allein 126.148 GWh aus Gas gewonnen wurden. Fast die Hälfte der gesamten Stromproduktion wurde somit aus diesem Energieträger gewonnen. Im Weiteren setzte sich die Stromgewinnung aus Kohle mit 38.403 GWh, Öl mit 12.131 GWh, Biobrennstoffe mit 17.094 GWh, Abfall mit 4.917 GWh, Wasserkraft mit 44.257 GWh, Geothermal mit 6.289 GWh, Solar PV mit 22.104 GWh, Wind mit 17.689 GWh und sonstigen Quellen mit 736 GWh zusammen (IEA, 2018).

Wie klimafreundlich die italienische Stromproduktion in der Vergangenheit bzw. heute aussieht, ist aufgrund des veränderten Einsatzes von Energieträgern auf den ersten Blick nicht gleich ersichtlich. Ähnlich jedoch wie in Polen dominierte der fossile Anteil den Erneuerbaren deutlich in der Energiegewinnung. Stellte man im Jahr 1990 82,3 % aus fossilen Energieträgern her, betrug der Anteil der Erneuerbaren lediglich 17,7 %, wobei der Großteil dieses Anteils der Wasserkraft zu verdanken war. Dieses Verhältnis änderte sich über die Zeit jedoch deutlich. Die fossilen Energieträger dominierten zwar im Jahr 2016 mit 62,8% immer noch, jedoch schaffte man eine Steigerung bei den Erneuerbaren von 19,5% gegenüber 1990. (IEA, 2018).

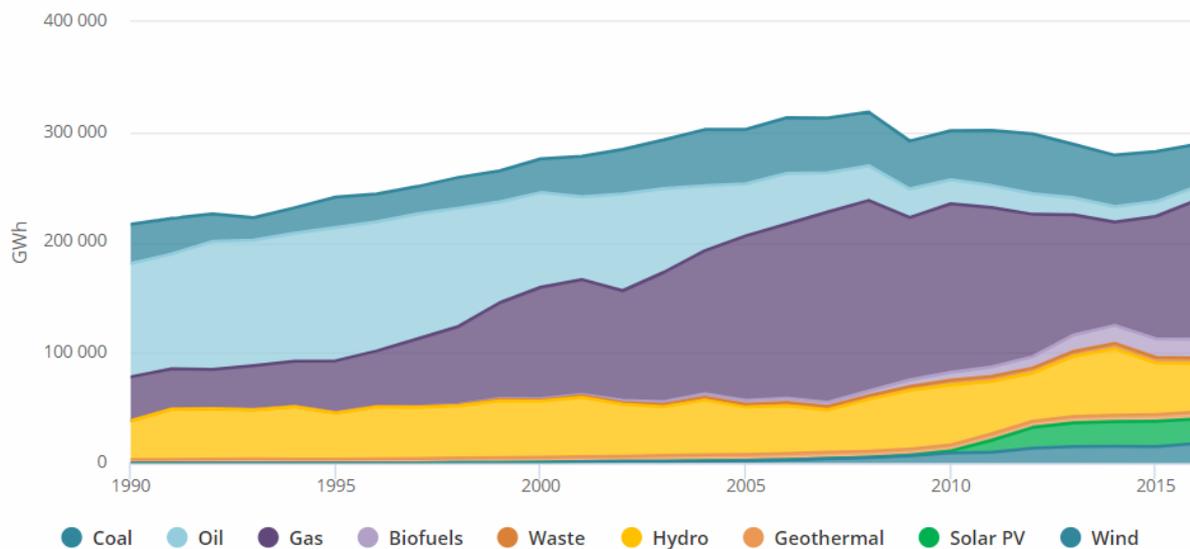


Abbildung 21: Stromproduktion durch verschiedene Energieträger zwischen 1990 und 2016 in Italien (IEA, 2018)

Obwohl die Stromproduktion in Italien in der Vergangenheit hauptsächlich durch fossile Energieträger bewerkstelligt wurde, erreichte man dennoch im Vergleich zu Polen einen deutlich niedrigeren Wert an CO₂-Emissionen pro Kilowattstunden. So verursachte man im Jahr 1990 eine Emissionsrate von 555,1 g CO₂/kWh, was jedoch deutlich weniger ist, als Polen im Jahr 2016 verursachte (= 773,3 g CO₂/kWh). Aufgrund des wachsenden Einsatzes von erneuerbaren Energieträgern bei der Stromgewinnung und durch die Umstellung des damaligen Hauptenergiebringers von Öl auf Gas konnte man im Jahr 2016 die CO₂-Emissionsintensität gegenüber 1990 fast um die Hälfte senken. Insgesamt verursachte man durch die Stromproduktion im Jahr 2016 256,2 g CO₂/kWh (EEA, 2019).

Diese Reduktion an CO₂-Emissionen ist auch gut in Abbildung 22 zu sehen. Über den Zeitverlauf gab es, ähnlich wie in Österreich, eine ständige Auf- und Abwärtsbewegung der Kurve, jedoch ist die Verminderung der Emissionen deutlich erkennbar. Wie bereits erwähnt beruht die Verringerung an CO₂-Emissionen auf dem immer größer werdenden Anteil an erneuerbarer Energie und auf dem Einsatz von Gas in der Stromgewinnung. Obwohl Gas auch zu den fossilen Energieträgern zählt, besitzt es gegenüber Kohle und Öl den Vorteil, dass es einerseits einen geringen Anteil an Schwefel beinhaltet, andererseits 40 % weniger CO₂-Emissionen je Einheit als Kohle und 25 % weniger CO₂-Emissionen je Einheit als Öl verursacht. Dennoch führt der Einsatz von unkonventionellen Gasressourcen wie Schiefergas und Flözgas (eine Art Grubengas) zu speziellen Umweltbelastungen (EEA, 2019).

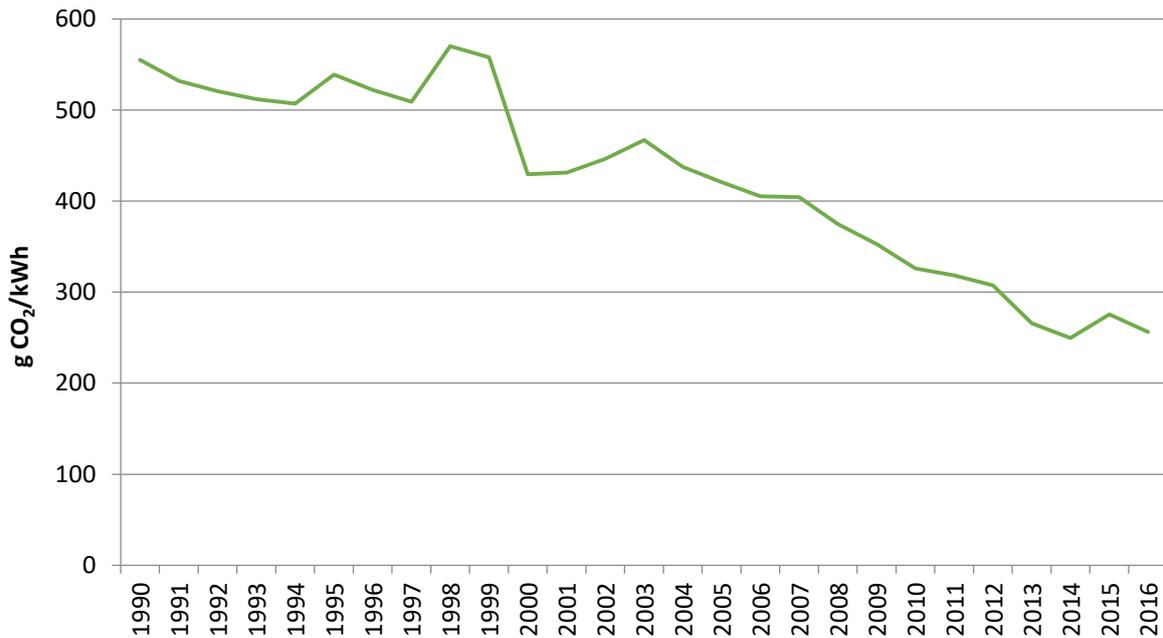


Abbildung 22: CO₂-Emissionsintensität der Stromerzeugung zwischen 1990 und 2016 in Italien (EEA, 2019)

Überschüsse und Mängel in der Stromproduktion führen jedoch auch in Italien zu einem Energiehandel mit dem Ausland. Im Vergleich zu Österreich oder Polen wird in Italien, gemessen in kWh, am meisten Strom importiert und am wenigsten exportiert (CIA, 2016a; CIA, 2016b). Der durch den Handel neu entstandene Energie-Mix schlägt sich jedoch wiederum mit einem neuen Emissionsbild zu Buche. So ergibt sich für Italien eine CO₂-Intensität von 431 g CO₂-eq/kWh (Moro und Lonza, 2018).

Vergleicht man nun in Abbildung 23 den italienischen energetischen Endverbrauch mit Österreich oder Polen, merkt man, dass der erzeugte Strom wiederum unterschiedlich zwischen den Sektoren aufgeteilt wird. Auffallend ist jedoch, dass, wie in Österreich, der Verkehrssektor etwa ein Drittel des gesamten Stromverbrauches ausmacht. Insgesamt wurden im Jahr 2016 von allen Sektoren 1.348.277,53 GWh verbraucht. Von diesem Gesamtenergieverbrauch fallen nun 33,74 % auf den Verkehrssektor, 22,57 % auf den Industriesektor und 43,69 % auf die Gruppe der Sonstigen, wobei hier wieder anzumerken ist, dass der Sektor der privaten Haushalte, wie in Polen, den größten Anteil dieser Gruppe ausmacht. Des Weiteren ist noch zu erwähnen, dass zusätzlich in der Gruppe der Sonstigen der Sektor „Fischfang“ enthalten ist, der jedoch nur einen Bruchteil des gesamten energetischen Endverbrauches beträgt (Eurostat, 2018b).

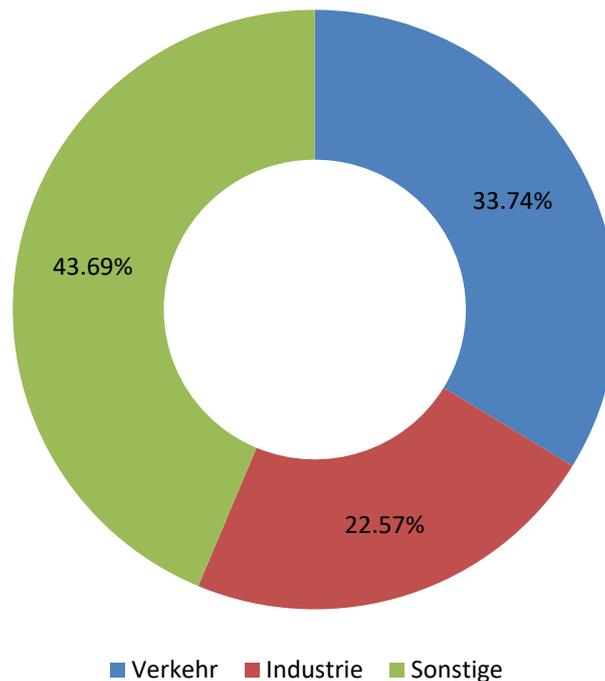


Abbildung 23: Energetischer Endverbrauch von Italien im Jahr 2016 nach Sektoren in Prozent (Eurostat, 2018b)

Sieht man sich den energetischen Endverbrauch des gesamten Verkehrssektors in absoluten Zahlen an, kommt man im Jahr 2016 durch den Straßenverkehr, den Bahnverkehr, den internationalen und nationalen Luftverkehr, den Binnenschiffverkehr, den Rohrleitungstransport und den sonstigen Transporten auf einen Verbrauch von 454.849,30 GWh. Wie auch in Österreich oder Polen ist hier wiederum der Straßenverkehr für den meisten Verbrauch verantwortlich. Insgesamt 383.371,32 GWh wurden dadurch im Jahr 2016 verbraucht, was etwa 84 % des gesamten Verbrauches des Verkehrssektors entspricht (Eurostat, 2018b).

Bezogen auf die eingesetzten bzw. verbrauchten Energieträger, gibt es auch in Italien keine großen Unterschiede zu den anderen zwei Ländern. Allein 94 % wurden im Jahr 2016 durch Erdöl bzw. Erdölprodukte abgedeckt, was in absoluten Zahlen 360.809,12 GWh entspricht. Die restlichen Prozente wurden wiederum durch Gas mit 10.397,22 GWh, durch erneuerbare Energie (zuzüglich feste und flüssige Biokraftstoffe sowie Holzkohle) mit 12.106,83 GWh und durch Strom mit 69,78 GWh abgedeckt (Eurostat, 2018b).

2.3.3 Fahrzeug- und Treibstoffherstellung

Neben dem Mobilitätsverhalten und der Stromgewinnung haben auch die Fahrzeug- und Treibstoffproduktion einen bestimmten Einfluss auf die Umwelt. Wie sehr diese zwei Aspekte die jeweilige Antriebstechnologie in ihrer Umweltfreundlichkeit beeinflussen, wird im Folgenden aufgezeigt.

2.3.3.1 Fahrzeugproduktion

Bei der Fahrzeugherstellung kommen je nach Antriebstechnologie unterschiedliche Materialien zum Einsatz, die Hauptbestandteile der Fahrzeuge sind dennoch in etwa gleich. Die meisten Fahrzeuge bestehen zum Großteil aus (verzinktem) Stahl, Gusseisen, Aluminium, Glas und Kunststoffkomponenten (Fritz et al., 2018).

Der wirkliche Unterschied zwischen den Fahrzeugen wird hauptsächlich durch den jeweiligen Antriebsstrang verursacht. So fallen bei Elektrofahrzeugen einige Komponenten, die für den Antrieb von konventionell getriebenen Fahrzeugen notwendig sind, wie zum Beispiel das Getriebe, weg. Aufgrund des relativ geringen Gewichtes des Elektromotors im Vergleich zum Verbrennungsmotor wirkt dies im weiteren gewichtsreduzierend für das gesamte Fahrzeug. Durch das Einbauen eines Akkumulators in beispielsweise einem batteriebetriebenen Fahrzeug relativiert sich jedoch der Vorteil dieser Gewichtsreduzierung (Pötscher et al., 2014).

Dass ein Akku aufgrund seiner Größe bzw. seines Gewichtes den soeben genannten Fahrzeugtyp nicht nur schwerer macht, sondern ihn auch einen größeren CO₂-Rucksack beschert, ist in Abbildung 24 gut ersichtlich. So verursacht zunächst die Produktion eines rund zwei Tonnen schweren BEVs inklusive eines 60-kWh-Akkus eine Emissionsmenge von ca. 19,7 Tonnen CO₂-eq. Derselbe Fahrzeugtyp mit einem Gewicht von etwa 2,3 Tonnen und einem 90-kWh-Akku schlägt sich jedoch schon mit rund 22,5 Tonnen CO₂-eq Emissionen zu Buche (Nefzger, 2019).

Etwas besser schneidet hingegen ein Brennstoffzellenfahrzeug bei der Herstellung ab. Verglichen mit einem rein elektrisch betriebenen Fahrzeug besitzt diese Antriebstechnologie nur eine kleine Traktionsbatterie. Was sich bei diesem Fahrzeugtyp jedoch in Bezug auf die Emissionsentstehung gravierend auswirkt, ist zum einen die Herstellung der Brennstoffzelle, zum anderen die Produktion des Wasserstofftanks. So kommt ein Fahrzeug dieses Typs mit einem Gewicht von etwa

1,9 Tonnen und einer Brennstoffzellenleistung von 95 kW auf rund 16,5 Tonnen CO₂-eq Emissionen (Nefzger, 2019).

Vergleicht man nun die Produktion der beiden Elektrofahrzeuge mit jener eines dieselbetriebenen Fahrzeuges wird klar, dass bei dessen Herstellung die geringsten Emissionen freigesetzt werden. Obwohl für ein konventionelles Fahrzeug, wie oben bereits erwähnt, mehrere Komponenten für den Antrieb erforderlich sind, verglichen zu Elektrofahrzeugen, verursacht das Produktionsverfahren eines solchen Fahrzeugtyps mit einem Gewicht von etwa 1,8 Tonnen nur runde 10 Tonnen CO₂-eq Emissionen (Nefzger, 2019). In diesem Vergleich stellt somit die Fahrzeugproduktion eines dieselbetriebenen Fahrzeuges die emissionsärmere Variante dar.

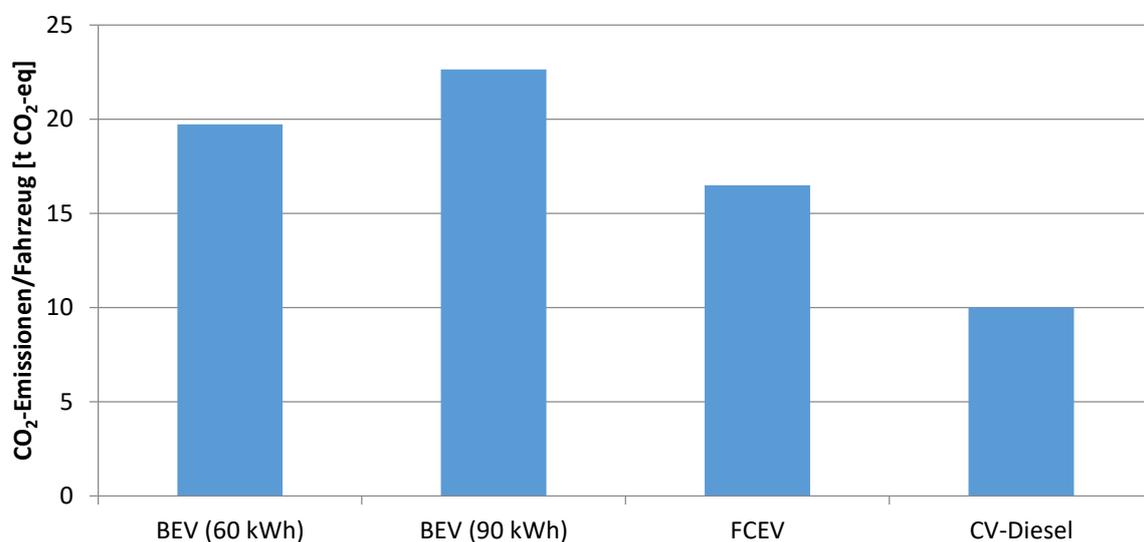


Abbildung 24: CO₂-Emissionen durch die Herstellung von verschiedenen Antriebstechnologien (Nefzger, 2019; eigene Berechnung)

Wieso jedoch die beiden Elektrofahrzeuge beim Herstellungsverfahren doch deutlich mehr CO₂-Emissionen verursachen als ein konventionelles Fahrzeug, liegt hauptsächlich an speziellen Komponenten in ihrem Antriebsstrang.

Wie oben bereits erwähnt spielt hinsichtlich des großen CO₂-Rucksacks beim batteriebetriebenen Fahrzeug der Akkumulator eine bestimmte Rolle. Grundsätzlich setzt sich dieser aus Batteriezellen, Batteriemanagementsystem, Gehäuse, Anode, Kathode und weiteren kleineren Bestandteilen zusammen. Für die Fertigung jedes einzelnen Bestandteiles wird eine gewisse Menge an Energie benötigt, jedoch ist der Herstellungsprozess der Batteriezellen am energieintensivsten. Mehr als 50 % der gesamten Produktionsenergie für einen Akkumulator gehen auf die Kappe der

Zellenfertigung. Je nachdem wie sauber der Strom ist, der für die Akkuproduktion verwendet wird, kann der CO₂-Rucksack eines batteriebetriebenen Fahrzeuges größer oder kleiner ausfallen (Agora Verkehrswende, 2019).

Die Ursache für die höhere Emissionsentstehung beim Herstellungsprozess von Brennstoffzellenfahrzeugen gegenüber Dieselfahrzeugen, liegt nicht wie beim BEV an der Akkuherstellung, sondern, wie schon erwähnt, an der Brennstoffzellen- und Wasserstofftankproduktion. Im Grunde besteht eine Brennstoffzelle aus einer Bipolar-Platte, einer Membran-Elektrodeneinheit, einem Katalysator, einer Gasdiffusionsschicht, einer Membran, mehrere Systemkomponenten und weiteren kleinen Elementen (Sternberg et al., 2019). Der Fertigungsprozess dieser Bestandteile verursacht unterschiedlich hohe Emissionen, jedoch kann der größte Anteil davon dem Katalysator und den Systemkomponenten zugeschrieben werden. Im Detail betrachtet sind es Platin, Metalle und Kunststoffe, durch deren Verarbeitung die hohen Emissionen bei der Brennstoffzellenfertigung anfallen (Schlichtmeier, 2019).

Der somit vorhandene CO₂-Rucksack eines FCEV erhöht sich im Weiteren noch durch die Herstellung des Wasserstofftanks. Dieser setzt sich im Prinzip aus Karbonfasermaterial, Kunststoff und weiteren Systemkomponenten zusammen. Die bei der Tankproduktion einhergehenden Emissionen können größtenteils der Fertigung des Karbonfasermaterials zugeschrieben werden. Kunststoffe und Systemkomponenten machen hingegen nur einen kleinen Teil der Emissionen aus (Sternberg et al., 2019).

2.3.3.2 Treibstoffproduktion

Wie umweltfreundlich die verschiedenen Antriebstechnologien sind, hängt unter anderem auch von der Treibstoffherstellung ab. Aufbauend auf die Fahrzeugtypen, die in dieser Arbeit behandelt werden, muss somit aufgezeigt werden, welchen CO₂-Fußabdruck die Herstellung von Diesel, Wasserstoff und Strom verursacht. Da Letztgenanntes bereits im Kapitel 2.3.2 behandelt wurde, muss hier nicht mehr darauf eingegangen werden. Relevant ist dies jedoch für die Umweltfreundlichkeit von batteriebetriebenen Fahrzeugen. Dies bedeutet, je mehr CO₂-Emissionen durch die Stromgewinnung verursacht werden, desto größer ist der CO₂-Fußabdruck eines batteriebetriebenen Fahrzeuges. Beinhaltet somit der Strom-Mix eines Landes einen großen Anteil an erneuerbaren Energieträgern, wären die Emissionen eines BEVs

deutlich geringer, als wenn fossile Energieträger die Oberhand bei der Stromgewinnung inne hätten (Ramachandran und Stimming, 2015).

In welchem Größenverhältnis die Treibstoffproduktion den CO₂-Fußabdruck von Diesel- oder Brennstoffzellenfahrzeuge verändert, hängt hauptsächlich davon ab, welches Herstellungsverfahren angewendet wird. Bei der klassischen Produktion von Dieseldieselkraftstoff, welcher in der Raffinerie aus Erdöl gewonnen wird, entstehen Emissionen in der Größe von 54 g CO₂-eq/kWh. Umgerechnet entspricht das 533,5 g CO₂-eq/l (Klell, et al., 2018). Aufgrund einer immer wiederkehrenden Forderung der Dekarbonisierung und Elektrifizierung des Verkehrssektors, wie eingangs schon erwähnt, ist es nun auch möglich, den Dieseldieselkraftstoff aus Strom zu gewinnen. Der Energiebedarf der notwendig ist, einen Liter Diesel mittels Strom zu produzieren, beträgt etwa 27,3 kWh (Schwarzer, 2018). Würde man beispielhalber die Produktion mit dem österreichischen Strom-Mix durchführen, käme man auf 9.118,2 g CO₂-eq/l. Umgerechnet ergibt sich dadurch eine Emissionsbelastung von 922,9 g CO₂-eq/kWh. Dies übersteigt somit die CO₂-Belastung, die durch das konventionelle Herstellungsverfahren verursacht wird, sehr deutlich.

Ähnlich wie bei der Dieseldieselproduktion hat sich auch bei der Herstellung von Wasserstoff ein konventionelles Standardverfahren entwickelt. In der sogenannten Dampfreformierung wird Wasserstoff aus Erdgas erzeugt, wodurch auch hier ein fossiler Energieträger die Basis stellt. Die Emissionen, die durch das Produktionsverfahren entstehen, überschreiten jedoch jene der Dieseldieselproduktion deutlich. So kommt es bei der konventionellen Herstellung von Wasserstoff zu einer Emissionsbelastung von 10,6 kg CO₂-eq/kg H₂ (Sternberg et al., 2019). Umgerechnet würde dies einem Wert von 318 g CO₂-eq/kWh entsprechen. Mittels der Elektrolyse ist es jedoch auch hier möglich strombasierend Wasserstoff zu erzeugen. Um mit dieser Technologie ein Kilogramm Wasserstoff zu produzieren, ist eine Energie von 54 kWh Strom notwendig (Sternberg et al., 2019). Würde man wiederum mit dem österreichischen Strom-Mix diese Menge an Wasserstoff herstellen, käme man auf eine Emissionsbelastung von etwa 18 kg CO₂-eq/kg H₂. Dies entspricht in etwa einem Wert von 541 g CO₂-eq/kWh. Somit führt auch hier die Wasserstoffherzeugung mittels Strom zu höherem Emissionsausstoß, als mit der konventionellen Methode.

Es gibt noch eine Vielzahl mehr an Möglichkeiten Diesel, Wasserstoff oder auch Strom zu produzieren. Aufgrund des Schwerpunktes dieser Arbeit wird hier jedoch nicht genauer darauf eingegangen.

3 Methodik der Datenauswertung

Um im Folgenden auf die zu Beginn gestellten Forschungsfragen einzugehen, ist es notwendig eine entsprechende Systemabgrenzung durchzuführen. In Abbildung 25 ist gut zu sehen, auf welchen Bereich sich die Berechnungen im Ergebnisteil beziehen.

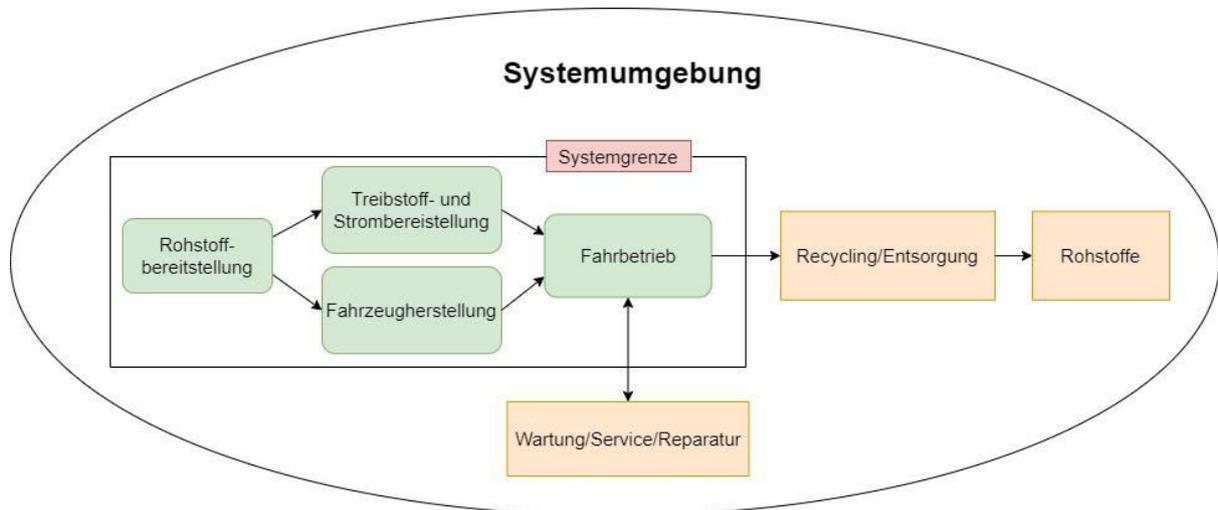


Abbildung 25: Systemgrenze für die CO₂-Bilanzierung unterschiedlicher Antriebstechnologien (eigene Darstellung)

Um einen realistischen Vergleich zwischen verschiedenen Antriebstechnologien zu generieren, wurden Fahrzeugtypen in etwa der gleichen Größe bzw. mit ähnlichem Gewicht ausgewählt. Würde man diese beiden Faktoren der Fahrzeuge zu unterschiedlich wählen, wäre deren Vergleich nicht sehr aussagekräftig, da Größe bzw. Gewicht unter anderem einen wesentlichen Einfluss auf die Emissionsentstehung bei der Fahrzeugproduktion haben (Fritz et al., 2018).

In Tabelle 1 sind weitere technische Details der verschiedenen Antriebstechnologien angeführt, welche Schlüsselparameter für die Berechnungen im Ergebnisteil darstellen.

Tabelle 1: Technische Daten unterschiedlicher Antriebstechnologien (Sternberg et al., 2019)

	Fahrzeug-kategorie	Leer-gewicht [kg]	Batteriegröße [kWh]	Ø-Spezifischer Verbrauch je 100 km	Reichweite [km]
Dieselfahrzeug	SUV	1.750		5,9 l ^[1]	
Batteriebetriebenes Fahrzeug	SUV	2.044	60	19,5 kWh	~ 300
Batteriebetriebenes Fahrzeug	SUV	2.266	90	20,4 kWh	> 400
Brennstoffzellen-fahrzeug	SUV	1.919	1,5 (+ Brennstoffzelle Leistung 95 kW)	0,95 kg ^[1]	> 500

Basierend auf den in Tabelle 1 dargestellten technischen Daten kann ermittelt werden, welche CO₂-Emissionsmenge die Antriebstechnologien durch deren Herstellung, durch die für den Fahrbetrieb notwendige Kraftstoffbereitstellung sowie durch den Fahrbetrieb selbst verursachen. In welcher Größenordnung die Emissionen den jeweiligen Fahrzeugen zugeschrieben werden, ist in Tabelle 3 gut sichtbar.

Zu erwähnen ist, dass die Akkuproduktion für Elektrofahrzeuge in der Literatur derzeit mit unterschiedlichen Klimabilanzen beziffert wird, was in Tabelle 2 gut zu sehen ist. Aufbauend auf den verschiedenen Literaturwerten wurde für diese Arbeit ein Durchschnittswert berechnet. Damit ergibt sich für die Akkuherstellung eine Klimabilanz von 97,25 kg CO₂-eq/kWh Batteriekapazität, dessen Wertigkeit auch in den Berechnungen des Ergebnisteiles mit einfließt.

^[1] WLTP-Verbrauch

Tabelle 2: Klimabilanz der Akkuproduktion (Emilsson & Dahllöf, 2019; Dai, et al., 2019; Kelly, et al., 2019; Recharge, 2018; Sternberg, et al., 2019; Agora Verkehrswende, 2019)

	[Emilsson & Dahllöf, 2019]	[Dai, et al., 2019]	[Kelly, et al., 2019]	[Recharge, 2018]	[Sternberg, et al., 2019]	[Agora Verkehrswende, 2019]
CO ₂ -Emissionen Akkuherstellung (kg CO ₂ -eq/kWh)	61–106	73	43–142	77	65–160	145

Im Bereich des Fahrbetriebes ist anzumerken, dass es bei Dieselfahrzeugen zu einem deutlichen Unterschied in der CO₂-Bilanz kommt, wenn diese mit konventionellem oder mit synthetischem Kraftstoff betrieben werden. Wie in Tabelle 3 dargestellt, gilt grundsätzlich, dass bei der Verbrennung eines konventionellen Dieselmotors als auch eines synthetischen Kraftstoffes CO₂-Emissionen freigesetzt werden. Bei der Gewinnung von E-Diesel kommt jedoch, wie im Kapitel 1.3.1 bereits erwähnt, CO₂ als Ressource zum Einsatz, welches unter anderem aus Industrieprozessen entnommen oder aus der Atmosphäre entzogen wird. Wird also bei der Herstellung eines synthetischen Kraftstoffes die gleiche Menge an CO₂-Emissionen aus den erwähnten Bereichen entnommen, welche im Fahrbetrieb wieder freigesetzt wird, ist das Dieselfahrzeug klimaneutral unterwegs (Rudolph, 2019).

Tabelle 3: CO₂-Emissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien aufgrund Fahrzeugherstellung, Energiebereitstellung und Fahrbetrieb (Nefzger, 2019; Sternberg et al., 2019; eigene Berechnung)

	CO ₂ -Emissionen Rumpf- & Antriebsherstellung [kg CO ₂ -eq/Fahrzeug]	CO ₂ -Emissionen Akkuherstellung [kg CO ₂ -eq/Akku]	CO ₂ -Emissionen Brennstoffzelle- & H-Tankherstellung [kg CO ₂ -eq /Brennstoffzelle & H-Tank]	CO ₂ -Emissionen Fahrbetrieb [g CO ₂ -eq/km]	CO ₂ -Emissionen Energiebereitstellung [g CO ₂ -eq/km]
BEV _{60 kWh}	13.882,5	5.835	0	0	AT: 65,13
					PL: 191,1
					IT: 84,045
BEV _{90 kWh}	13.882,5	8.752,5	0	0	AT: 68,136
					PL: 199,92
					IT: 87,924
FCEV _{el.}	10.742,625	145,875	5.602,5	0	AT: 171,342
					PL: 502,74
					IT: 221,103
FCEV _{MSR}	10.742,625	145,875	5.602,5	0	100,7
CV-Diesel _{konv.}	9.995	0	0	157 ^[2]	31,478
CV-Diesel _{el.}	9.995	0	0	157 ^[2]	AT: 537,9738
					PL: 1.578,486
					IT: 694,194

Ein weiterer Faktor, der für den Ergebnisteil von Bedeutung ist, stellt das Lebensende eines Fahrzeuges dar. In der Literatur wird dieses mit einer Fahrleistung von 150.000 km beziffert. Um einen Vergleich mit anderen wissenschaftlichen Texten zu ermöglichen, wird auch in dieser Arbeit die genannte Fahrleistung als Basiswert für das Lebensende herangezogen.

^[2] CO₂-Emissionen nach WLTP

Aufbauend auf die soeben genannten Daten und Faktoren, werden im folgenden Kapitel, welches sich in zwei Segmente unterteilt, die Umwelteffekte der verschiedenen Antriebstechnologien ermittelt.

Im ersten Abschnitt des Ergebnisteiles werden die CO₂-Gesamtemissionen der verschiedenen Antriebssysteme, aufsummiert auf deren Lebensende (= 150.000 km), berechnet. Diese ergeben sich durch die Addition der indirekten (Fahrzeugherstellung und Energiebereitstellung) und der direkten CO₂-Emissionen (Fahrbetrieb). Im Bereich der Energiebereitstellung wird hier einerseits auf das Argument der Dekarbonisierung und Elektrifizierung eingegangen, andererseits wird auch das konventionelle Standardverfahren zum Vergleich herangezogen.

Im darauffolgenden Abschnitt werden die Umwelteffekte abhängig nach Nutzungsart der Fahrzeugtypen errechnet. Entscheidende Faktoren stellen hier sowohl der CO₂-Rucksack der Fahrzeugproduktion als auch die Fahrleistung dar. Wie in Tabelle 3 dargestellt, stoßen ein BEV als auch ein FCEV beim Fahrbetrieb zwar keine Emissionen aus, jedoch kann man durch die Multiplikation von deren Verbrauch und der Emissionen, welche durch die Energiebereitstellung anfallen, auch deren CO₂-Fußabdruck über die Zeit aufzeigen. Somit kann gezeigt werden, welche CO₂-Emissionensmenge der kilometerabhängige Fahrbetrieb der jeweiligen Antriebstechnologie verursacht.

4 Ergebnisse

4.1 Indirekte und direkte Emissionen der Antriebstechnologien

Im aktuellen Kapitel finden sich die Ergebnisse für den ersten Teil der Forschungsfrage. Es werden die Gesamtemissionen, die sich aus den indirekten und den direkten Emissionen zusammensetzen, der unterschiedlichen Antriebstechnologien dargestellt. Aufgrund dieser Emissionsdarstellung kann die CO₂-Bilanz der verschiedenen Fahrzeugtechnologien bezogen auf eine Fahrleistung von 150.000 km genau aufgezeigt werden. Neben der Emissionsbilanzierung von konventionell betriebenen Diesel- und Brennstoffzellenfahrzeugen wird auch der CO₂-Fußabdruck dieser Antriebssysteme dargestellt, wenn diese mit synthetischem Kraftstoff bzw. mit Wasserstoff aus Elektrolyse betrieben werden.

Des Weiteren kann demonstriert werden, dass es deutliche Unterschiede in der Emissionsentstehung bei der Treibstoffherstellung gibt, wenn dieser in unterschiedlichen Ländern produziert wird. Als Beispiel hierfür werden die Länder Österreich, Polen und Italien herangezogen.

4.1.1 Österreich

Die Diagramme in Abbildung 26 zeigen ein eindeutiges Bild wie umweltfreundlich diesel-, wasserstoff- und batteriebetriebene Fahrzeuge bei der CO₂-Gesamtemissionsbetrachtung in Österreich zueinander abschneiden. Im Allgemeinen sieht man, dass die einzelnen Prozessabschnitte (Fahrzeug-, Treibstoffproduktion und Fahrbetrieb) jede Fahrzeugtechnologie in unterschiedlicher Weise in ihrer Umweltfreundlichkeit beeinflussen.

Betrachtet man jeden Prozessschritt im Einzelnen, so stellt man fest, dass es bereits bei der Fahrzeugproduktion große Unterschiede in der CO₂-Bilanz der verschiedenen Fahrzeugtypen gibt. So verursacht die Herstellung eines Dieselfahrzeugs die wenigsten CO₂-Emissionen im Vergleich zu den anderen Antriebstechnologien. In der Kategorie der Elektrofahrzeuge schneidet das Brennstoffzellenfahrzeug etwas besser ab als das rein elektrisch betriebene Fahrzeug. Grund dafür ist, dass die Herstellung der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks für das FCEV geringere CO₂-Emissionen verursacht, als die Akkuproduktion für das BEV. Es zeigt sich damit deutlich, dass ein batteriebetriebenes Fahrzeug bei der Herstellung die schlechteste CO₂-Bilanz im Vergleich zu den anderen Fahrzeugtypen aufweist. Klar zu sehen ist

auch, dass durch einen größeren Akkumulator im Fahrzeug der CO₂-Fußabdruck sich nochmals erhöht.

Der Abschnitt der Treibstoffproduktion ist jener Bereich, welcher die CO₂-Bilanz der Antriebstechnologien am unterschiedlichsten beeinflusst. So ist zunächst ersichtlich, dass die Kraftstoffbereitstellung für ein konventionell betriebenes Dieselfahrzeug die geringsten CO₂-Emissionen im Vergleich zu den anderen Treibstoffproduktionsverfahren verursacht. Etwas mehr an Emissionen setzt die Energiebereitstellung für die beiden batteriebetriebenen Fahrzeuge frei, wobei der Emissionsanteil bei der Fahrzeugtechnologie mit dem größeren Akku leicht höher ausfällt, als jener bei einem Fahrzeug mit einem kleineren Akkumulator. Hinter den beiden batteriebetriebenen Fahrzeugen reiht sich das Treibstoffgewinnungsverfahren für das Brennstoffzellenfahrzeug ein, wobei ersichtlich ist, dass die Emissionsbilanz bei der konventionellen Wasserstoffgewinnung deutlich besser ausfällt, als wenn diese mittels Elektrolyse durchgeführt wird. Das emissionsreichste Energiebereitstellungsverfahren stellt jenes des synthetischen Dieseltreibstoffes dar. Im Vergleich zu den anderen verursacht diese Kraftstoffgewinnung die meisten CO₂-Emissionen.

Im Bereich des Fahrbetriebes wird das dieselbetriebene Fahrzeug durch die Verbrennung von Dieselkraftstoff und der damit einhergehenden Emissionsfreisetzung weiters in seiner Umweltfreundlichkeit belastet. Die Ausnahme stellt ein Fahrzeug mit synthetisch betriebenem Dieseltreibstoff dar, welches damit klimaneutral unterwegs ist. Batteriebetriebene und brennstoffzellenbetriebene Antriebstechnologien stoßen im Betrieb keine weiteren Emissionen aus, wodurch sie in diesem Bereich die Umwelt nicht weiter belasten.

Betrachtet man nun im Falle von Österreich die CO₂-Gesamtemissionen der einzelnen Antriebstechnologien so verursacht das BEV mit einem 60-kWh-Akku mit 196,6 g CO₂-eq/km die geringsten Emissionen. Knapp dahinter rangiert das FCEV bei konventioneller Treibstoffherstellung (210,6 g CO₂-eq/km) sowie das BEV mit einem 90-kWh-Akku (219 g CO₂-eq/km). Deutlich mehr emittiert ein konventionelles Dieselfahrzeug, welches sich mit 255,1 g CO₂-eq/km zu Buche schlägt. Diese Antriebstechnologie wird bezüglich der CO₂-Emittierung jedoch von einem FCEV übertroffen, dessen Wasserstoff mit Elektrolyse gewonnen wird (281,3 g CO₂-eq/km). Mit stolzen 604,6 g CO₂-eq/km bildet das Dieselfahrzeug, welches mit synthetischem Kraftstoff betrieben wird, das Schlusslicht.

Mit Ausnahme des FCEV, dessen Treibstoff mittels Elektrolyse gewonnen wird, haben alle übrigen Elektrofahrzeuge in Österreich eine bessere CO₂-Bilanz als das konventionelle Dieselfahrzeug. Prozentuell gesehen verursacht somit das BEV mit einem 90-kWh-Akku ca. 7 % weniger CO₂-Emissionen pro Kilometer, das FCEV liegt bei ca. 10 % weniger CO₂-Emissionen pro Kilometer und das BEV mit einem 60-kWh-Akku emittiert sogar ca. 13 % weniger CO₂-Emissionen pro Kilometer als das konventionelle Dieselfahrzeug.

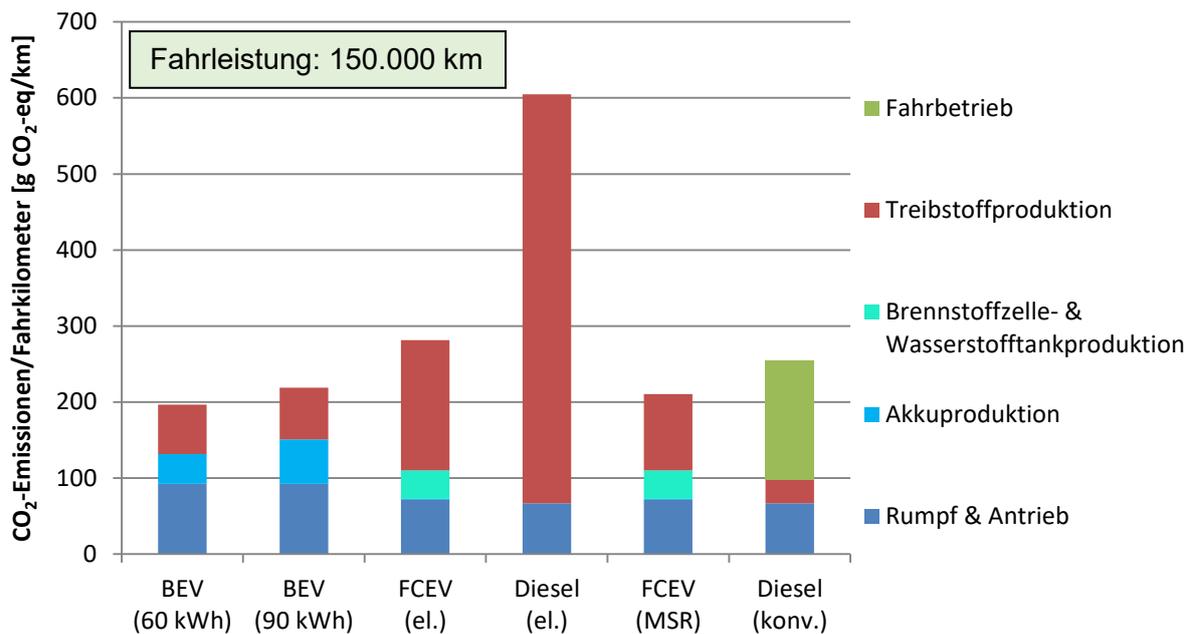


Abbildung 26: CO₂-Gesamtemissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien am Beispiel Österreich (eigene Darstellung)

4.1.2 Polen

Wie umweltfreundlich diesel-, wasserstoff- und batteriebetriebene Fahrzeuge in Polen im Hinblick auf ihre CO₂-Gesamtemissionen zueinander abschneiden, ist in Abbildung 27 gut zu sehen. Es ist klar ersichtlich, dass die einzelnen Antriebstechnologien in diesem Land eine deutlich andere Umweltfreundlichkeit zueinander aufweisen, als sie es in Österreich getan haben.

Legt man das Augenmerk wiederum auf die einzelnen Prozessabschnitte, ist im Bereich der Fahrzeugfertigung anzumerken, dass die daraus resultierende CO₂-Bilanz der Antriebstechnologien ident ist mit jener aus dem österreichischen Beispiel. Interessant ist jedoch der Abschnitt der Energiebereitstellung für die unterschiedlichen Antriebstechnologien. Das Emissionsbild, welches bei den konventionellen Gewinnungsverfahren von Diesel und Wasserstoff entsteht, ist wiederum ident mit jenem aus dem obigen Beispiel. Wird der benötigte Treibstoff jedoch aus Strom gewonnen, ergibt sich ein deutlich unterschiedlicheres Emissionsbild im Vergleich zu Österreich. Verursacht unter anderem die Fahrzeugproduktion der beiden batteriebetriebenen Fahrzeuge in Österreich die meisten Emissionen dieses Fahrzeugtyps, ist es in Polen genau umgekehrt. Deutlich mehr an CO₂-Emissionen als bei der Energiebereitstellung für die BEVs entstehen jedoch bei der Wasserstoffgewinnung durch Elektrolyse für das FCEV. Aber auch wie im obigen Beispielland stellt die Herstellung von synthetischem Dieselkraftstoff die schlechteste CO₂-Bilanz im Vergleich zu allen anderen Kraftstoffgewinnungsverfahren dar. Bei der Energiebereitstellung aus Strom entstehen in Polen demnach etwa dreimal mehr CO₂-Emissionen als wenn die Treibstoffgewinnung in Österreich stattfinden würde.

Im Bereich des Fahrbetriebes gelten wiederum die gleichen Bestimmungen wie im österreichischen Beispiel beschrieben. Somit ist das konventionell betriebene Dieselfahrzeug jene Antriebstechnologie, deren Umweltfreundlichkeit durch den Fahrbetrieb negativ beeinträchtigt wird.

Im CO₂-Gesamtemissionsvergleich der unterschiedlichen Antriebstechnologien schneidet im Falle von Polen das FCEV bei konventioneller Treibstoffgewinnung mit 210,6 g CO₂-eq/km am besten ab. Mit seinen 255,1 g CO₂-eq/km rangiert das konventionell betriebene Dieselfahrzeug knapp hinter dem Brennstoffzellenfahrzeug. Deutlich schlechter schneiden die Antriebstechnologien ab, deren Treibstoff aus Strom gewonnen wird. So verursacht das BEV mit einem 60-kWh-Akku

322,6 g CO₂-eq/km, jenes mit 90-kWh-Akku sogar 350,8 g CO₂-eq/km. Noch schlechter schneidet im Gesamten das brennstoffzellenbetriebene Antriebssystem mit Wasserstoff aus Elektrolyse ab, welches sich mit 612,7 g CO₂-eq/km zu Buche schlägt. Mit 1.645,1 g CO₂-eq/km bildet das dieselbetriebene Fahrzeug mit synthetischem Kraftstoff das klare Schlusslicht.

Ein BEV mit einem 60-kWh-Akku würde also um ca. 12 % mehr Emissionen pro Kilometer verursachen als ein konventionelles Dieselfahrzeug und sogar um ca. 21 % mehr CO₂-Emissionen pro Kilometer als ein FCEV mit konventioneller Energiebereitstellung. Im Vergleich zu Österreich würde somit ein solch rein elektrisch betriebenes Fahrzeug in Polen keine Vorteile sondern sogar deutliche klimarelevante Nachteile mit sich bringen. Zurückzuführen ist dies auf die vergleichsweise schlechtere CO₂-Bilanz des polnischen Strom-Mix.

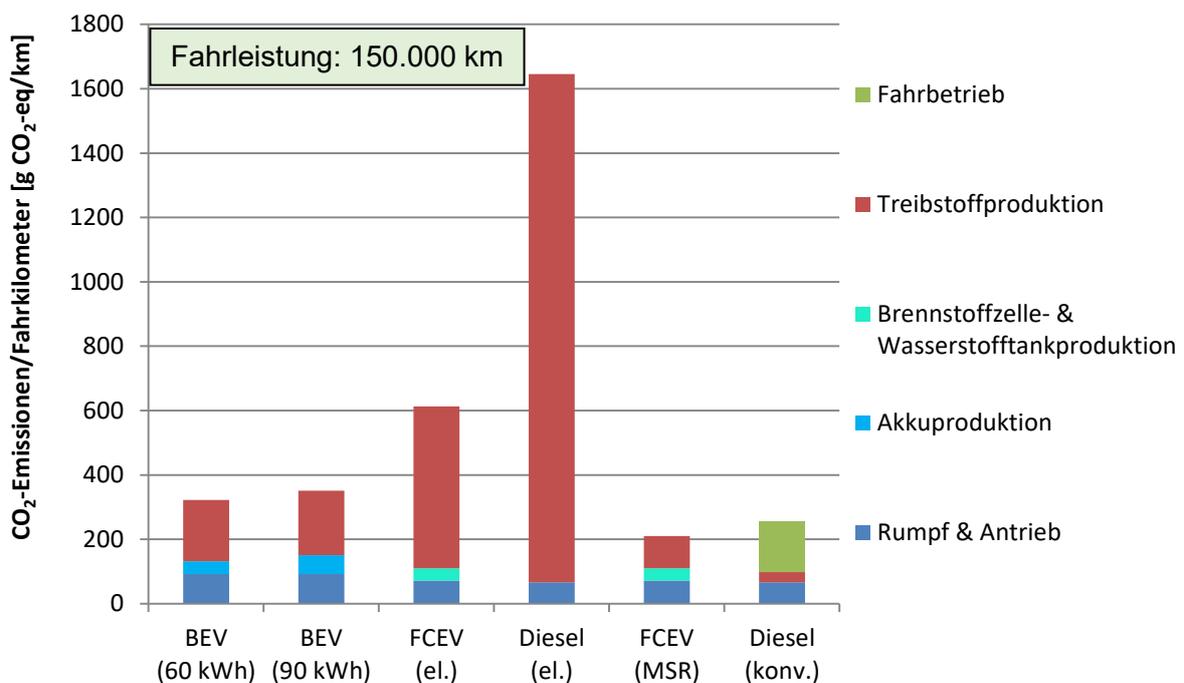


Abbildung 27: CO₂-Gesamtemissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien am Beispiel Polen (eigene Darstellung)

4.1.3 Italien

Die Umweltfreundlichkeit von diesel-, wasserstoff- und batteriebetriebenen Fahrzeugen in Italien wird in Abbildung 28, welche wiederum die CO₂-Gesamtemissionen der unterschiedlichen Antriebstechnologien aufzeigt, gut dargestellt. Obwohl die Grafik ein ähnliches Bild wie jenes von Österreich darstellt, gibt es jedoch deutliche Unterschiede, was die CO₂-Emissionsmenge betrifft, welche in den einzelnen Prozessabschnitten entsteht.

Da ein allgemeiner CO₂-Wert für die Fahrzeugproduktion herangezogen wurde, ist auch in Italien die CO₂-Bilanz für die Herstellung der verschiedenen Fahrzeugtypen ident mit den anderen beiden Ländern.

Durch das Hinzuziehen der Energiebereitstellung kommt es jedoch wiederum zu Unterschieden zwischen den bereits erwähnten Beispielländern sowie zwischen den verschiedenen Antriebstechnologien. Die Emissionsentstehung bei der konventionellen Treibstoffgewinnung für das Dieselfahrzeug sowie für das FCEV wirft keine Unterschiede zwischen den Ländern auf. Dies ist jedoch wiederum ein kleiner Vorteil für die beiden BEVs, da deren Energiebereitstellung in Italien weniger CO₂-Emissionen verursacht als die konventionelle Wasserstoffgewinnung für das FCEV. Die Gewinnung von Wasserstoff aus Elektrolyse sowie die vom synthetischen Dieseldieselkraftstoff sind, wie auch in Österreich und in Polen, die emissionsreichsten Verfahren, wodurch diese Methoden wiederum das Schlusslicht bezüglich Umweltfreundlichkeit bilden.

Der Fahrbetrieb stellt, wie im Kapitel 4.1.1 bereits erwähnt, jenen Bereich dar, der durch die Antriebstechnologien, mit Ausnahme des konventionell betriebenen Dieselfahrzeuges, die Umwelt mit keinen weiteren Emissionen belastet.

Bei der CO₂-Emissionsgesamtbetrachtung der unterschiedlichen Antriebstechnologien in Italien erzielt, wie auch in Polen, das FCEV bei konventioneller Treibstoffgewinnung mit 210,6 g CO₂-eq/km die wenigsten Emissionen. Mit seinen 215,5 g CO₂-eq/km rangiert jedoch das BEV mit einem 60-kWh-Akku nur knapp dahinter. Leicht mehr verursacht das batteriebetriebene Fahrzeug mit einem 90-kWh-Akku (238,8 g CO₂-eq/km). Das konventionell betriebene Dieselfahrzeug landet mit seinen 255,1 g CO₂-eq/km etwa im Mittelfeld. Deutlich mehr an Emissionen als das Dieselfahrzeug verursacht das FCEV bei Wasserstoffgewinnung durch die Elektrolysetechnik (331 g CO₂-eq/km). Diese Antriebstechnologie wird emissionstechnisch nur mehr von einem dieselbetriebenen

Fahrzeug übertrumpft, welches mit synthetischem Kraftstoff unterwegs ist. Insgesamt verursacht ein solches Dieselfahrzeug in Italien 760,8 g CO₂-eq/km.

Das FCEV bei konventioneller Treibstoffproduktion würde also wiederum ca. 10 % weniger CO₂-Emissionen pro Kilometer als ein konventionelles dieselpetriebenes Fahrzeug verursachen, das BEV mit einem 60-kWh-Akku ca. 8 % und das BEV mit einem 90-kWh-Akku ca. 3 %. Ähnlich wie in Österreich hätte der Einsatz von Elektrofahrzeugen, mit Ausnahme eines FCEV, welches mit Wasserstoff aus Elektrolyse fährt, einen klimarelevanten Vorteil. Aufgrund des etwas schlechteren CO₂-Fußabdruckes des italienischen Strom-Mix fällt dieser jedoch im Vergleich zu Österreich deutlich geringer aus.

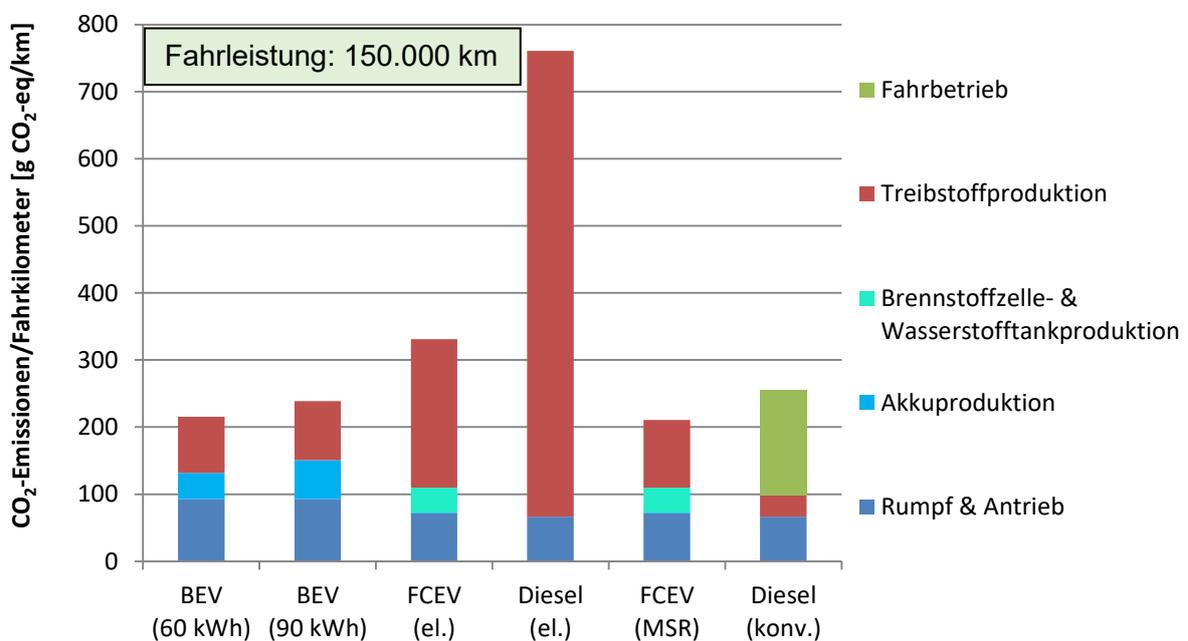


Abbildung 28: CO₂-Gesamtemissionen unterschiedlicher Antriebstechnologien am Beispiel Italien (eigene Darstellung)

4.2 Nutzungsspezifische Emissionen der Antriebstechnologien

Wie nun die Klimabilanz der Antriebstechnologien in deren Betriebsphase aussieht, wird in diesem Kapitel beantwortet. Diese Bilanzierung wurde wiederum an den Beispielländern Österreich, Polen und Italien durchgeführt. Es kann gezeigt werden, dass je nach Land und Nutzungsverhalten die verschiedenen Antriebstechnologien eine unterschiedliche CO₂-Bilanz zueinander aufweisen.

4.2.1 Österreich

Wie in Kapitel 2.3.1 bereits erwähnt ist ein durchschnittlicher Österreicher 8.820 Kilometer pro Jahr unterwegs. Um das theoretische Lebensende eines PKWs hierzulande zu erreichen, ist das Fahrzeug somit rund 17 Jahre in Betrieb. Welche CO₂-Emissionsmenge die unterschiedlichen Antriebstechnologien über diese Dauer hinweg verursachen, kann anhand Abbildung 29 gut abgelesen werden.

Wie in Tabelle 3 dargestellt, werden im Vergleich zu den anderen Antriebsarten bei der Herstellung des Dieselfahrzeuges am wenigsten CO₂-Emissionen verursacht. Je nach eingesetztem Kraftstofftyp schmilzt dieser Vorsprung zu den Elektrofahrzeugen in einem unterschiedlichen Ausmaß. Wird unter anderem das Dieselfahrzeug mit synthetischem Treibstoff betrieben, verliert es nach rund 30.000 km bereits das Rennen gegen alle anderen Antriebstechnologien. Bei konventioneller Betriebsweise hat das Dieselfahrzeug jedoch über längere Zeit einen klaren umweltrelevanten Vorteil gegenüber den Elektrofahrzeugen. Erst nach etwa 110.000 km erzielt das BEV mit einem 60-kWh-Akku eine bessere CO₂-Bilanz als das konventionell betriebene Dieselfahrzeug. Deutlich länger benötigt das FCEV, welches mit Wasserstoff aus Erdgas fährt. Bis zu 140.000 km muss dieses zurücklegen, um umweltfreundlicher als das Dieselfahrzeug zu sein. Noch länger braucht das BEV mit einem 90-kWh-Akku, welches erst ab 150.000 km eine bessere CO₂-Bilanz vorweisen kann. Einen klaren Umweltvorteil hat das dieselbetriebene Fahrzeug gegenüber einem FCEV, welches mit Wasserstoff aus Elektrolyse betrieben wird. Dieses stößt noch lange nach dem theoretischen Lebensende eines Fahrzeuges mehr CO₂-Emissionen aus als das konventionell betriebene Dieselfahrzeug.

Würde man also ein Fahrzeug in Österreich bis zu einer Fahrleistung von 150.000 km bzw. darüber hinaus betreiben, wären alle Elektrofahrzeuge, mit Ausnahme des FCEV, dessen Treibstoff aus Strom generiert wird, die besseren

umweltrelevanten Alternativen zum Dieselfahrzeug, wobei das BEV mit einem 60-kWh-Akku dabei die umweltfreundlichste CO₂-Bilanz aufweisen würde.

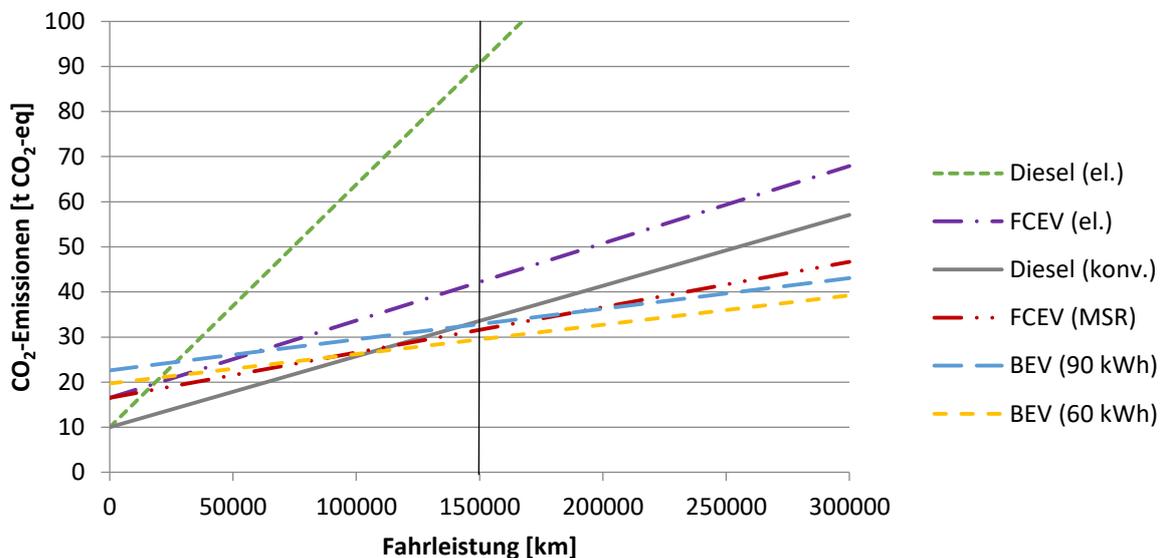


Abbildung 29: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien in Österreich (eigene Darstellung)

Betrachtet man nun in Abbildung 30 den CO₂-Ausstoß der einzelnen Fahrzeugtechnologien pro gefahrenen Kilometer, kann gut abgeleitet werden, bis zu bzw. ab welcher Fahrleistung eine der genannten Antriebssysteme einen klimarelevanten Vorteil gegenüber den anderen hat. Zunächst ist gut zu sehen, dass, je höher die entstehende CO₂-Emissionsmenge bei der Herstellung eines Fahrzeugtyps ist, desto deutlich höhere Fahrleistungen muss diese Antriebstechnologie aufweisen, um seinen CO₂-Rucksack wieder abzubauen. Dadurch flacht die Kurve der Dieselfahrzeuge klar schneller ab als jene der Elektrofahrzeuge. Im weiteren Verlauf konvergieren die Kurven zu dem jeweiligen angegebenen bzw. errechneten CO₂-Wert, welchen die Antriebstechnologien pro Kilometer ausstoßen.

Im Vergleich zu der vorherigen Abbildung ist es nun in Abbildung 30 möglich, zu eruieren, wie sehr jeder einzelne Kilometer der verschiedenen Antriebstechnologien die Umwelt mit CO₂-Emissionen belastet. Je nach Nutzungsintensität eines Antriebssystems entsteht eine bestimmte Fahrleistung, wodurch aus umweltrelevanter Sicht eine Fahrzeugtechnologie positiv hervorsticht. Würde man zum Beispiel ein Fahrzeug in Österreich deutlich über 150.000 km betreiben, wäre ein BEV mit einem

60-kWh-Akku klar die umweltschonendste Variante im Vergleich zu den anderen Antriebstechnologien. Würde man ein Antriebssystem jedoch weniger intensiv nutzen und käme man aufgrund des kalendarischen Endes eines PKWs schlussendlich nur auf 50.000 km, wäre das konventionell betriebene Dieselfahrzeug die bessere umweltrelevante Option.

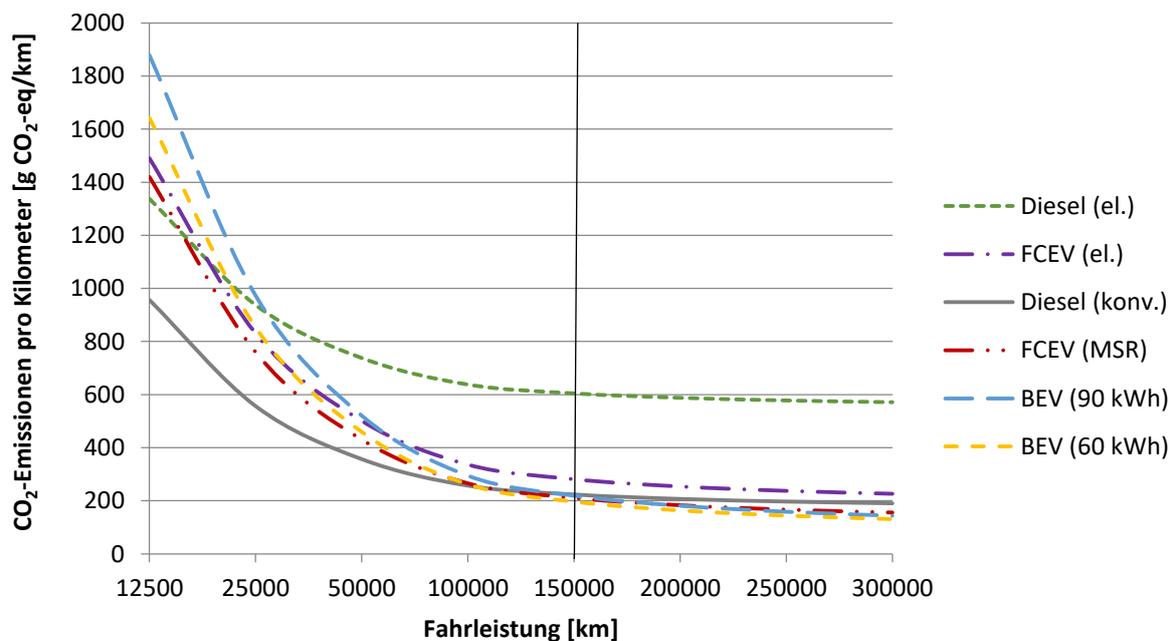


Abbildung 30: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien pro gefahrenen Kilometer in Österreich (eigene Darstellung)

4.2.2 Polen

Die Fahrleistung eines durchschnittlichen Autofahrers in Polen beträgt, wie bereits erwähnt, 8.130 Kilometer pro Jahr. Somit ist ein PKW in diesem Land etwa 18 bis 19 Jahre in Betrieb, um das theoretische Lebensende zu erreichen. Die CO₂-Emissionsmenge, welche in dieser Nutzungsphase bzw. darüber hinaus durch die einzelnen Antriebstechnologien verursacht wird, ist in Abbildung 31 schön zu sehen.

Aufbauend auf den Herstellungsemissionen der einzelnen Fahrzeugtechnologien stellt zu Beginn auch hier das Dieselfahrzeug die umweltfreundlichste Variante dar. Interessant ist jedoch, dass sich im Vergleich zu Österreich der Vorsprung dieses Fahrzeugtyps je nach eingesetzter Kraftstoffart (konventionell oder synthetisch) nun deutlich unterschiedlich verändert. Nach nicht mal 6.500 km muss sich das mit synthetischem Kraftstoff betriebene Dieselfahrzeug gegenüber den anderen

Antriebssystemen geschlagen geben. Wird dieser Fahrzeugtyp jedoch konventionell betrieben, stellt er eine der umweltfreundlichsten Varianten dar. Ähnlich schlecht wie das synthetisch betriebene Dieselfahrzeug schneidet auch das FCEV ab, dessen Treibstoff mit Elektrolyse gewonnen wird. Findet damit ein Betrieb über 20.000 km statt, stellt es, bezogen auf dessen Umweltfreundlichkeit, die zweitschlechteste Option dar. Eine etwas bessere CO₂-Bilanz erreichen die beiden BEVs. Dennoch verursachen sie noch weit über 150.000 km hinaus deutlich mehr CO₂-Emissionen als ein konventionell betriebenes Dieselfahrzeug. Einzig und allein gelingt es dem FCEV, dessen Treibstoff aus Erdgas gewonnen wird, ab einer Fahrleistung von etwa 140.000 km eine bessere CO₂-Bilanz zu erreichen als das zuletzt erwähnte Dieselfahrzeug.

Sind es in Österreich die beiden BEVs, welche die umweltfreundlichsten Varianten der verschiedenen Antriebssysteme darstellen, so gelten in Polen das Diesel- sowie das Brennstoffzellenfahrzeug, deren Treibstoff auf konventionelle Art und Weise hergestellt wird, als die umweltfreundlichsten Optionen. Betreibe man ein Fahrzeug in Polen bis zu 150.000 km bzw. darüber hinaus, würde das genannte FCEV die klimafreundlichste Variante im Vergleich zu allen anderen Antriebstechnologien darstellen.

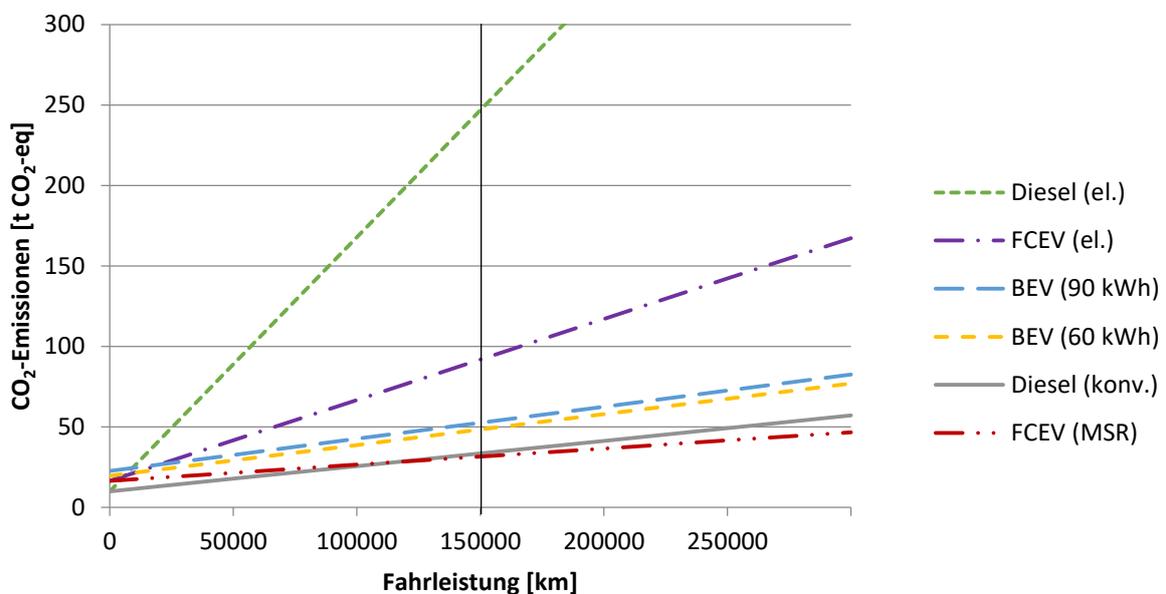


Abbildung 31: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien in Polen (eigene Darstellung)

Bei Betrachtung von Abbildung 32, welche den CO₂-Ausstoß pro gefahrenen Kilometer jeder einzelnen Antriebstechnologie darstellt, kann schnell festgestellt werden, dass in Polen das Betreiben der Fahrzeuge einen deutlich unterschiedlicheren Einfluss für die Umwelt darstellt als das Betreiben derselben Antriebssysteme in Österreich. So ist klar zu erkennen, dass die Kurven von all jenen Fahrzeugtechnologien, deren Treibstoff aus Strom gewonnen wird, schneller abflachen, was wiederum bedeutet, dass deren Kurve zu einem höheren CO₂-Wert konvergiert und diese Fahrzeuge somit pro gefahrenen Kilometer mehr CO₂-Emissionen ausstoßen, als es in Österreich der Fall ist. Betreibt man also die genannten Fahrzeugtypen bis zu einer Fahrleistung von 150.000 km, ist klar ersichtlich, dass diese eher die umweltschädigende Variante darstellen verglichen zu jenen, deren Kraftstoff auf fossiler Basis erzeugt wird.

Jedoch ist hier wiederum die Nutzungsintensität der entscheidende Faktor. Ist die Auslastungsintensität des Fahrzeuges so gering, dass das kalendarische Ende des Autos bei etwa 100.000 km eintritt, wäre aus umweltrelevanter Sicht das konventionell betriebene Dieselfahrzeug die richtige Wahl. Betreibt man jedoch das Fahrzeug deutlich über 150.000 km hinweg, würde man mit einem FCEV, welches mit Wasserstoff aus Erdgas betrieben wird, die Umwelt mehr schonen.

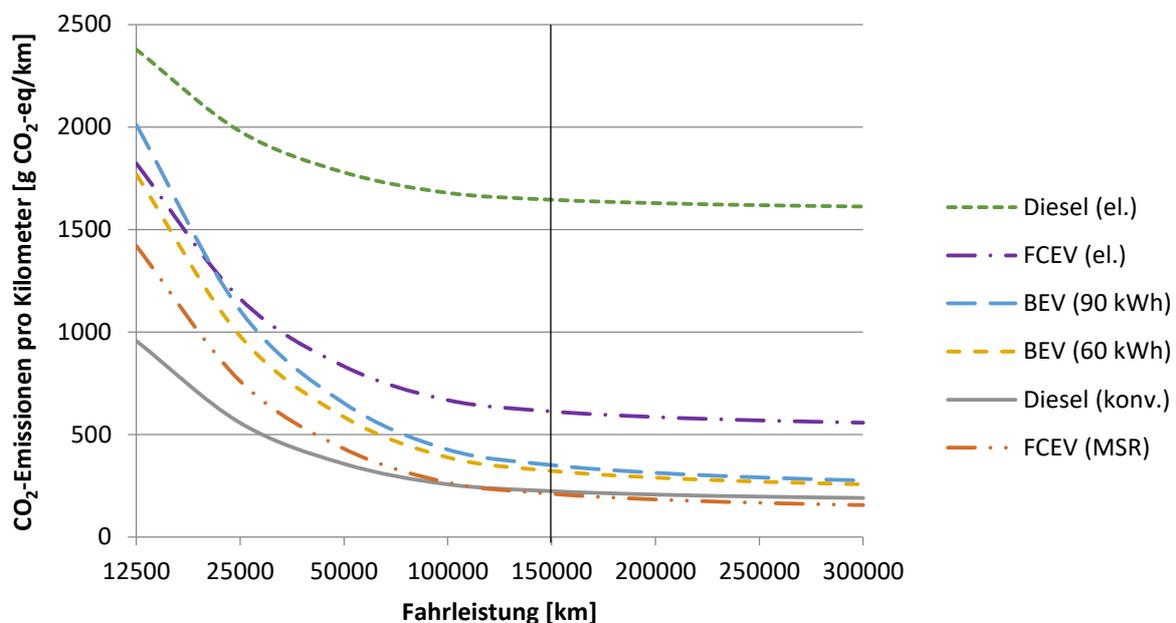


Abbildung 32: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien pro gefahrenen Kilometer in Polen (eigene Darstellung)

4.2.3 Italien

In Italien wird bei einer Fahrleistung von 10.950 Kilometer pro Person und Jahr deutlich mehr Auto gefahren als in den anderen beiden Ländern. Aufgrund dessen erreicht man das theoretische Lebensende eines Fahrzeuges in diesem Land auch etwas früher. Ein PKW wäre dadurch insgesamt 12 bis 13 Jahre in Betrieb. Welche Umwelteffekte das Betreiben der verschiedenen Antriebstechnologien in Italien mit sich zieht, ist in Abbildung 33 gut ersichtlich.

Aufbauend auf dem CO₂-Rucksack, den die Fahrzeugtechnologien aus deren Herstellung mit sich bringen, startet das Dieselfahrzeug wiederum mit einem klaren Vorsprung gegenüber den anderen Fahrzeugtypen. Durch das Betreiben mittels synthetischen Kraftstoffes schneidet das Dieselfahrzeug nicht gar so schlecht ab wie in Polen, stellt jedoch auch nach etwa 15.000 km die umweltfeindlichste Technologie von allen dar. Wiederum besser hält sich das konventionell betriebene Dieselfahrzeug, welches sich erst nach ungefähr 135.000 km dem BEV mit einem 60-kWh-Akku geschlagen geben muss. Eine klar bessere CO₂-Bilanz weist das fossilbetriebene Fahrzeug gegenüber dem BEV mit einem 90-kWh-Akku auf. Dieses müsste etwa 190.000 km unterwegs sein, um umweltfreundlicher als das Dieselfahrzeug zu sein. Vergleicht man jedoch dieses BEV mit einem FCEV, dessen Treibstoff aus Erdgas gewonnen wird, verliert es das Rennen im Bereich der Umweltfreundlichkeit auch deutlich über einer Fahrleistung von 150.000 km. Betreibe man das FCEV jedoch mit Wasserstoff aus Elektrolyse würde sich das Bild umkehren. Ein solches Brennstoffzellenfahrzeug wäre aber aus umweltrelevanter Sicht nicht nur schlechter als alle anderen Elektrofahrzeuge, sondern weist auch eine klar schlechtere CO₂-Bilanz auf als ein fossilbetriebenes Dieselfahrzeug.

Kristallisierten sich in Österreich die beiden BEVs als die umweltfreundlichste Variante nach einer Fahrleistung von etwa 200.000 km heraus, sieht dies in Italien deutlich anders aus. Zwar stellt das BEV mit einem 60-kWh-Akku auch hier die umweltschonendste Variante noch klar vor einer Fahrleistung von 150.000 km dar, das BEV mit einem 90-kWh-Akku muss sich jedoch gegenüber dem FCEV, welches mit Wasserstoff aus Erdgas fährt, geschlagen geben. Somit stellt dieses Brennstoffzellenfahrzeug die zweitfreundlichste Option hinsichtlich der Umweltfreundlichkeit aller Antriebstechnologien dar.

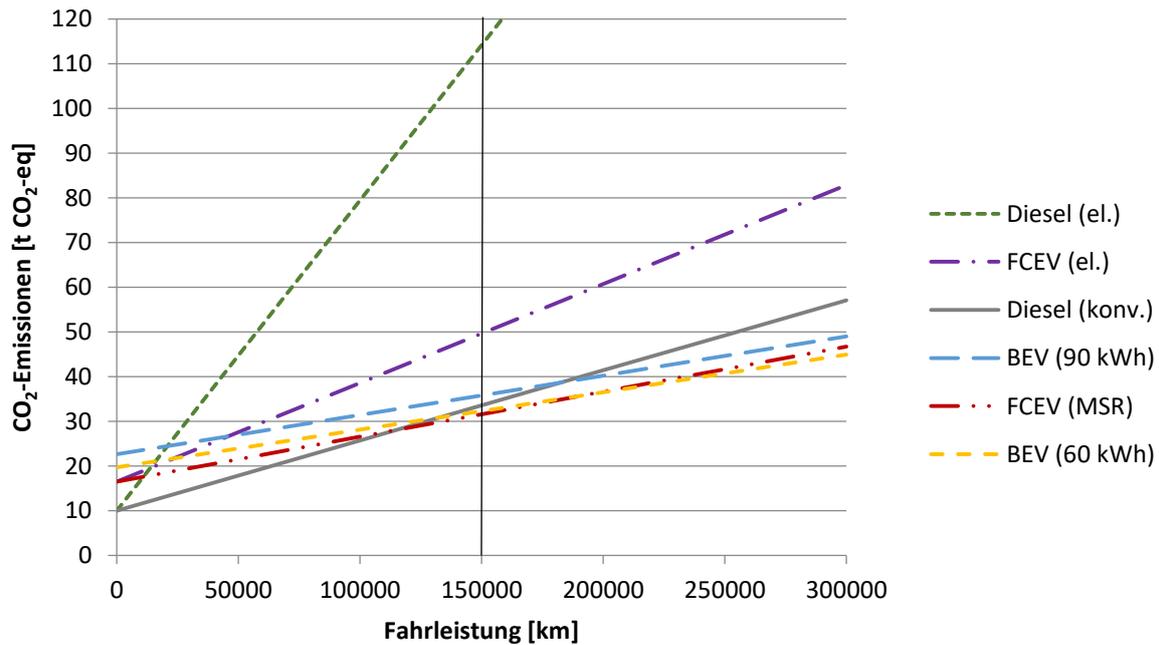


Abbildung 33: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien in Italien (eigene Darstellung)

Welchen CO₂-Austoß die Antriebstechnologien pro Kilometer aufweisen und bis zu bzw. ab welcher Fahrleistung sie einen umweltrelevanten Vorteil gegenüber den anderen Technologien zeigen, kann in Abbildung 34 gut abgelesen werden. Klar zu erkennen ist, dass der Kurvenverlauf der Antriebssysteme, deren Kraftstoff aus Strom gewonnen wird, ähnlich ausfällt wie jener im österreichischen Beispiel. Der CO₂-Wert zu dem die Kurven konvergieren, liegt jedoch etwas höher als jener in Österreich, wodurch die Fahrzeuge pro gefahrenen Kilometer zwar weniger CO₂-Emissionen verursachen als in Polen jedoch mehr als in Österreich. Somit müssen diese Fahrzeuge verglichen zu Österreich eine deutlich längere Strecke zurücklegen um ihren CO₂-Rucksack abzubauen.

Es ist jedoch wiederum der Fall, dass, wie auch bei den vorherigen Länderbeispielen, das konventionell betriebene Dieselfahrzeug bei einer Fahrleistung unter 100.000 km die umweltfreundlichste Wahl darstellt im Vergleich zu den übrigen Antriebstechnologien. Liegt die Auslastungsintensität eines Fahrzeuges aber deutlich über den 150.000 km, stellen aus umweltrelevanter Sicht die beiden BEVs als auch das FCEV, dessen Wasserstoff aus Erdgas gewonnen wird, die bessere Wahl dar. Von den genannten Elektrofahrzeugen würde jedoch das BEV mit einem 60-kWh-Akku bezogen auf die Fahrleistung die geringsten CO₂-Emissionen verursachen.

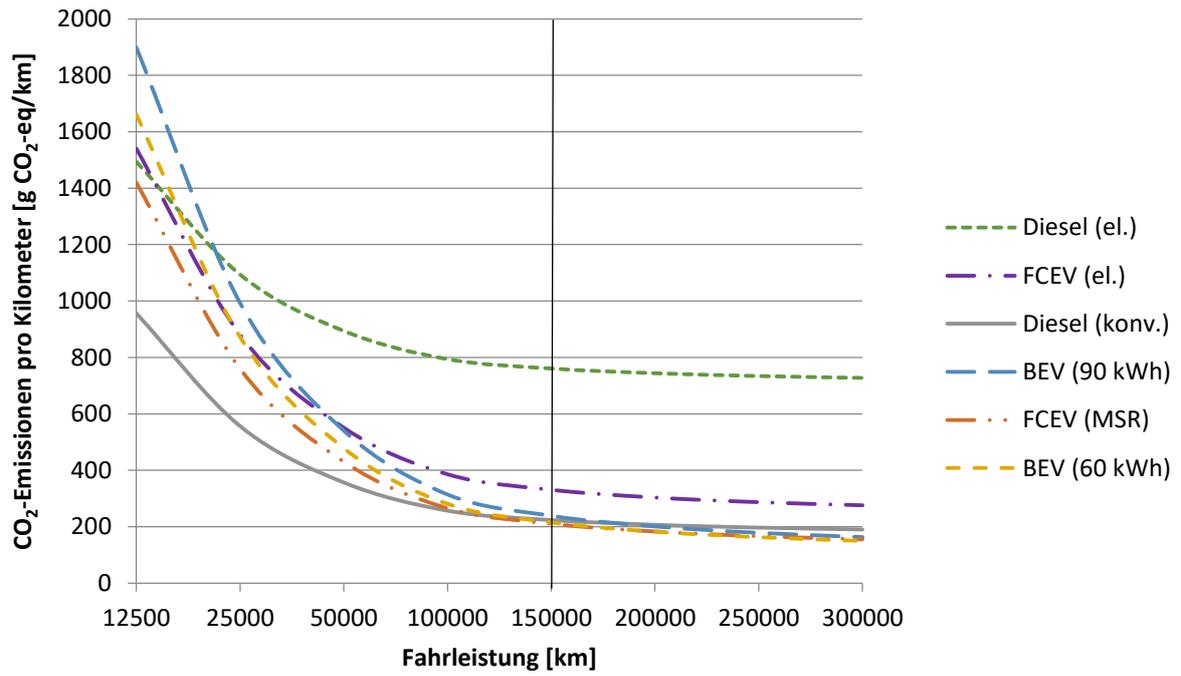


Abbildung 34: Klimabilanz verschiedener Antriebstechnologien pro gefahrenen Kilometer in Italien (eigene Darstellung)

5 Diskussion

Die Frage, welche Antriebstechnologie von diesel-, batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen die umweltfreundlichste Variante darstellt, kann, wie die Ergebnisse zeigen, nicht immer einfach beantwortet werden. Allein innerhalb eines Landes ist es oft schwierig, darauf eine Antwort zu finden. Entscheidend für die Beantwortung dieser Frage sind zwei Faktoren: Die Fahrleistung, welche mit einem PKW zurückgelegt wird, bis dieser sein kalendarisches Ende erreicht hat und der CO₂-Fußabdruck des Strom-Mix eines Landes, wodurch all jene Antriebstechnologien in ihrer Umweltfreundlichkeit beeinflusst werden, deren Treibstoff aus Strom gewonnen wird.

Sieht man sich unter anderem das Thema der direkten und indirekten CO₂-Emissionen der Fahrzeugtechnologien an, merkt man welche Auswirkung die Sauberkeit des Strom-Mix auf die einzelnen Fahrzeuge hat. Je aufwändiger es ist einen Treibstoff herzustellen, desto höher ist die CO₂-Bilanz eines Fahrzeuges, was gut zu sehen ist, wenn man im österreichischen Beispiel die CO₂-Bilanz des BEVs (60-kWh-Akku) mit der eines synthetisch betriebenen Dieselfahrzeuges vergleicht. Derselbe Vergleich in den andern beiden Ländern ergibt im Verhältnis betrachtet natürlich das gleiche Ergebnis. Vergleicht man jedoch die Länder untereinander ist zum Beispiel der Betrieb eines synthetisch angetriebenen Dieselfahrzeuges in Österreich deutlich umweltfreundlicher als in Italien oder Polen. Es ist somit gut erkennbar, dass der CO₂-Fußabdruck des Strom-Mix eines Landes hier einen klaren Einfluss darauf hat, wie umweltfreundlich die verschiedenen Antriebstechnologien zueinander abschneiden. Länderspezifisch betrachtet wären aufgrund des relativ CO₂-armen Strom-Mix in Österreich die beiden BEVs die umweltfreundlichsten Varianten. Ähnlich sieht es in Italien aus, wobei der etwas CO₂-reichere Strom-Mix das BEV mit einem 90-kWh-Akku klar schlechter abschneiden lässt als in Österreich und so auch das FCEV, dessen Wasserstoff aus Erdgas gewonnen wird, zu einer umweltfreundlichen Wahl macht. Deutlich anders sieht dies in Polen aus, wo Antriebstechnologien, deren Kraftstoffe aus fossilen Brennstoffen hergestellt werden, klar die umweltfreundlichste Variante darstellen.

In welcher Intensität ein PKW jedoch genutzt wird, entscheidet wiederum welche der verschiedenen Antriebssysteme die umweltfreundlichste Option darstellt. Da die Herstellungsemissionen der Elektrofahrzeuge jene eines Dieselfahrzeuges deutlich übersteigen, ist es wenig verwunderlich, dass sich das dieselbetriebene Fahrzeug

anfangs als die bessere Wahl bezogen auf die Umweltfreundlichkeit herauskristallisiert. Für ein konventionell betriebenes Dieselfahrzeug gilt dieses Argument, wie in den Ergebnissen gezeigt, auch für alle untersuchten Länder. Neben den erwähnten Herstellungsemissionen der Fahrzeuge ist es im Weiteren auch der bereits erwähnte CO₂-Fußabdruck des Strom-Mix des jeweiligen Landes, der von den Elektrofahrzeugen als auch jenen Fahrzeugen, die mit synthetischem Kraftstoff betrieben werden, eine bestimmte Fahrleistung abverlangt, um deren CO₂-Rucksack abzubauen. Dies ist auch der Grund wieso zum Beispiel ein BEV in Österreich seine Emissionslasten deutlich schneller reduziert als dasselbe BEV in Italien. Zu sehen ist dies auch schön im Ergebnisteil. So gilt ein BEV mit einem 60-kWh-Akku im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug in Österreich bei etwa 110.000 km als die umweltfreundlichste Wahl, in Italien jedoch erst ab etwa 135.000 km. Aufbauend auf diesen Zahlenwerten lässt sich jedoch schließen, dass in diesen beiden Ländern eine entsprechend hohe Fahrleistung aufgebracht werden muss, um diese Antriebstechnologie als die umweltfreundlichste Option zu bezeichnen. Wird also ein PKW eher wenig genutzt und erreicht sein kalendarisches Ende bei etwa 100.000 km ist nach wie vor das Dieselfahrzeug die bessere Wahl in allen untersuchten Ländern. Wird jedoch das Lebensende eines Fahrzeuges nach einer Fahrleistung von etwa 200.000 km erreicht, wären in Österreich und Italien wiederum bestimmte Elektrofahrzeuge die bessere Variante bezogen auf deren Umweltfreundlichkeit. Dieses Argument gilt jedoch nicht für Polen. Aufgrund des CO₂-reichen Fußabdruckes des Strom-Mix sind Elektrofahrzeuge hier klar die umweltschlechteste Option. Ein Dieselfahrzeug ist in diesem Land über eine große Fahrleistung hinweg die klar umweltverträglichste Wahl. Einzig und allein das FCEV, welches mit Wasserstoff aus Erdgas betrieben wird, würde deutlich über einer Fahrleistung von 150.000 km CO₂-ärmer unterwegs sein als das konventionell betriebene Dieselfahrzeug.

An den gezeigten Ländern ist also ersichtlich, wie sehr die Faktoren „Strom-Mix“ und „Fahrleistung“ die verschiedenen Antriebstechnologien in ihrer Umweltfreundlichkeit beeinflussen und dass es situationsabhängig ist, welche Antriebstechnologie die umweltfreundlichste darstellt.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die vorliegende Masterarbeit zeigt, dass aus derzeitiger Sicht jede der untersuchten Antriebstechnologien die Umwelt auf unterschiedliche Art und Weise beeinflusst. Die oben erwähnten externen Einflussfaktoren auf die Fahrzeuge spielen hierbei eine sehr große Rolle. Aus den dargestellten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass Elektrofahrzeuge als auch synthetisch betriebene Dieselfahrzeuge nicht so umweltfreundlich sind wie oft vermutet wird. Hierfür ist, wie oben bereits erwähnt, der länderspezifische CO₂-Fußabdruck des Strom-Mix verantwortlich. Je mehr Emissionen bei der Stromgewinnung anfallen, desto schlechter ist auch die CO₂-Bilanz der gerade erwähnten Antriebstechnologien. Dies ist gut zu sehen, wenn man das Abschneiden der Antriebssysteme zueinander in Österreich und in Polen vergleicht. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass eine saubere Energiegewinnung (zum Beispiel durch regenerative Energiequellen) elektrisch als auch synthetisch betriebene Fahrzeuge umweltfreundlicher abschneiden lässt als jene, deren Treibstoff aus fossiler Energie gewonnen wird.

Neben der Sauberkeit des Strom-Mix darf jedoch bei der Beurteilung der Umweltfreundlichkeit der unterschiedlichen Antriebstechnologien aus heutiger Sicht der Faktor „Fahrleistung“ ebenfalls nicht vernachlässigt werden. Je nachdem wie intensiv die untersuchten Antriebssysteme genutzt werden, stellen sie in einem unterschiedlichen Maß eine Belastung für die Umwelt dar. So zeigt sich, dass bei einer Fahrzeugnutzung bei der eine Fahrleistung von 100.000 km nicht überschritten wird das Dieselfahrzeug heute noch immer die umweltfreundlichste Variante der untersuchten Antriebsysteme darstellt. Wird jedoch durch intensive Nutzung eines Fahrzeuges eine hohe Fahrleistung erreicht, weisen heute bereits BEVs bei einem relativ sauberen Strom-Mix eine klar bessere CO₂-Bilanz auf als Dieselfahrzeuge.

Zukünftig könnte sich das Verhältnis zwischen konventionellen und alternativen Antriebssystemen aus umweltrelevanter Sicht jedoch deutlich ändern. Bereits heute sind zwei Entwicklungen erkennbar, die sich in Zukunft positive auf die gesamte Elektromobilität auswirken werden. So sieht man zum einen, dass sich die weltweite Stromproduktion, wie in Kapitel 2.3.2 dargestellt, hin zu einer CO₂-armen bzw. CO₂-freien Stromgewinnung entwickelt. Dadurch würde sich nicht nur die CO₂-Bilanz von Elektrofahrzeugen verbessern, sondern folglich auch von jenen Antriebstechnologien, deren Kraftstoff ebenfalls auf Strom basiert (zum Beispiel E-Diesel). Es ist in den letzten Jahren jedoch auch zu erkennen, dass die CO₂-

Belastung bei der Akkuherstellung für Elektrofahrzeuge klar rückläufig ist. Sollten sich diese beiden Trends in Zukunft fortsetzen, wäre das batteriebetriebene Fahrzeug der klare Hauptprofiteur dieser beiden Entwicklungen. In diesem Zukunftsszenario wäre auch der CO₂-Rucksack dieser Antriebstechnik deutlich geringer als er es heute ist, wodurch der Faktor „Fahrleistung“ ebenfalls massiv an Einfluss verlieren würde. In Zukunft könnte also nicht nur die hohe Energieeffizienz eines BEVs für das batteriebetriebene Fahrzeug sprechen.

7 Literaturverzeichnis

- Agora Verkehrswende, 2019, „Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial“, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), 2016, „Österreich unterwegs 2013/2014 – Ergebnisbericht zur österreichweiten Mobilitätserhebung Österreich unterwegs 2013/2014“, HERRY Consult GmbH.
- Central Intelligence Agency (CIA), 2016a, “The World Factbook – Electricity-Exports”, <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/fields/254rank.html> (30.07.2019).
- Central Intelligence Agency (CIA), 2016b, “The World Factbook – Electricity-Imports”, <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/fields/255rank.html> (30.07.2019).
- Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L. und Wang, M., 2019, “Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications”, Batteries 2019, 5 (48).
- dos Santos, D., 2019, „Was versteht man unter Power-to-Liquid?“, EUWID, <https://www.euwid-energie.de/was-versteht-man-unter-power-to-liquids/> (28.06.2019).
- Ehret, O., 2018, „Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen“, NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.
- Emilsson, E. und Dahllöf, L., 2019, “Lithium-Ion Vehicle Battery Production - Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling”, IVL Swedish Environmental Research Institute.
- European Environment Agency (EEA), 2019, “Overview of electricity production and use in Europe”, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment-4> (27.05.2019).
- Eurostat, 2018a, „Glossar: Energetischer Endverbrauch“, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Final_energy_consumption/de (27.05.2019).
- Eurostat, 2018b, „Energy balance sheets - 2016 DATA“, Luxemburg: Selbstverlag, ISBN: 978-92-79-92826-0.
- Eurostat, 2019, „Passenger cars in the EU“, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_cars_in_the_EU&oldid=395957#Overview (10.05.2019).

- Focus Online, 2017, „Fahrzeugbestand in Europa - Schon mehr als eine Viertelmilliarde Pkw“, https://www.focus.de/auto/news/fahrzeugbestand-in-europa-schon-mehr-als-eine-viertelmilliarde-pkw_id_7806379.html (07.05.2019).
- Forschungsinformationssystem (FIS), 2019a, „Antriebstechnologien im Straßenverkehr“, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/298652/> (06.05.2019).
- Forschungsinformationssystem (FIS), 2019b, „Well-to-Wheel Betrachtung der Antriebstechnologien“, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/332825/> (14.06.2019).
- Fritz, D., Heinfellner, H., Lichtblau, G., Pölz, W. und Stranner, G., 2018, „Update: Ökobilanz Alternativer Antriebe“, Umweltbundesamt GmbH.
- Herzog, K., 2018, „Elektromotoren und Hybridantrieb“, interner Bericht, Institut für Fahrzeugsystemtechnik und Kolbenmaschinen.
- International Energy Agency (IEA), 2018, „Statistics - Global energy data at your fingertips“, <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Energy%20supply&indicator=TPESbySource&mode=chart&dataTable=BALANCES> (22.05.2019).
- Karle, A., 2018, „Elektromobilität: Grundlagen und Praxis“, München: Carl Hanser Verlag, ISBN: 9783446456686.
- Kelly, J.C., Dai, Q. und Wang, M., 2019, „Globally regional life cycle analysis of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries“, Argonne National Laboratory.
- Klell, M., Eichlseder, H., und Trattner, A., 2018, „Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung“, Springer-Verlag, ISBN: 978-3-658-20446-4.
- Kranzl, S., Fritz, D., Heninger, E., Lichtblau, G., Pölz, W., Schreiber, H., Read, B., Deweis, M. und Kaitna, M., 2018, „Treibhausgasemissionen von Strom - Empfehlungen zur Öko-Bilanzierung“, Umweltbundesamt GmbH.
- Kreyenberg, D., 2016 „Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität - Total Cost of Ownership, Energieeffizienz, CO₂-Emissionen und Kundennutzen“, Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-14283-4.
- Langmann, G., 2018, „Abwärmeverluste beim Verbrennungsmotor“, <http://dmot.at/abwaerme.html> (09.04.2019).
- Lenz, B., 2012, „Zukunftsperspektive individuelle Mobilität – Anforderungen, Erwartungen und Bedürfnisse“, in: Jochem, P., Poganietz, W.-R., Grunwald, A. und Fichtner, W. (Hrsg.), Tagungsband des Workshops „Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen“, Karlsruhe, pp. 13 – 33.

- Moro, A. und Lonza, L., 2018, "Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles", Transportation Research Part D: Transport and Environment, 64, 5-14.
- Nefzger, N., 2019, „Wann die Brennstoffzelle das Batterieauto schlägt“, DER SPIEGEL, <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/brennstoffzelle-oder-elektroauto-welcher-antrieb-ist-besser-fuers-klima-a-1276800.html> (21.11.2019).
- Paschotta, R., 2018, „Ottomotor“, RP-Energie-Lexikon, <https://www.energielexikon.info/ottomotor.html> (06.05.2019).
- Paschotta, R., 2019, „Dieselmotor“, RP-Energie-Lexikon, <https://www.energielexikon.info/dieselmotor.html> (06.05.2019).
- Paschotta, R., 2020, „Dieselkraftstoff“, RP-Energie-Lexikon, <https://www.energielexikon.info/dieselmotor.html> (23.05.2020).
- Pischinger, S. und Seiffert, U., 2016, „Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik“, 8., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-658-09527-7
- Pötscher, F., Winter, R., Pölz, W., Lichtblau, G., Kutschera, U. und Schreiber, H., 2014 „Ökobilanz alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich“, Umweltbundesamt GmbH.
- Pröll, T., Mündliche Mitteilung vom 17.07.2019.
- Ramachandran, S. und Stimming, U., 2015, "Well to wheel analysis of low carbon alternatives for road traffic", Energy & Environmental Science, 8 (11), 3313-3324.
- RECHARGE, 2018, "PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications", s.l.: European Commission.
- Rudolph, F., 2019, „Der Beitrag von synthetischen Kraftstoffen zur Verkehrswende: Optionen und Prioritäten“, Wuppertal Institut.
- Schlichtmeier, T., 2019, „Brennstoffzelle versus Batterie“, Elektronik, <https://www.elektroniknet.de/elektronik/power/brennstoffzelle-versus-batterie-168950.html> (21.11.2019).
- Schwarzer, C. M., 2018, „Sprit aus Strom ist machbar, aber zu teuer“, Zeit Online, <https://www.zeit.de/mobilitaet/2018-03/synthetischer-kraftstoff-e-fuels-diesel-strom-verkehrswende> (20.08.2019).
- Simons, K. und Franken, M., 2018, „Was sind Brennstoffzellen – und wie funktionieren sie?“, co2online, <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/brennstoffzellen-heizung/was-sind-brennstoffzellen/> (06.05.2019).

- Skarics, R., 2018, „E-Mobilität: Strom gegen Wasserstoff“, Der Standard, <https://derstandard.at/2000083402305/E-Mobilitaet-Strom-gegen-Wasserstoff> (06.05.2019).
- Springer Professional, 2012, „Pkw-Antriebe im Überblick - Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft“, <https://www.springerprofessional.de/motorentechnik/pkw-antriebe-im-ueberblick-vergangenheit-gegenwart-und-zukunft/6561052> (09.04.2019).
- Sternberg, A., Hank, C. und Hebling, C., 2019, „Treibhausgasemissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km“, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- The Regulatory Assistance Project (RAP), 2018, „Report on the Polish Power System - Version 2.0“, in Auftrag gegeben von Agora Energiewende.
- U.S. Department of Energy, 2019a, „Where the Energy Goes: Electric Cars“, <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml> (09.04.2019).
- U.S. Department of Energy, 2019b, „Where the Energy Goes: Gasoline Vehicles“, <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml> (09.04.2019).
- U.S. Department of Energy, 2019c, „Where the Energy Goes: Hybrids“, <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-hev.shtml> (09.04.2019).
- VCÖ, 2014, „VCÖ: Österreich hat im EU-Vergleich viele Autos, aber niedrige Fahrleistung“, <https://www.vcoe.at/presse/presseaussendungen/detail/vcoe-oesterreich-hat-im-eu-vergleich-viele-autos-aber-niedrige-fahrleistung> (23.08.2019).
- VCÖ, 2016, „VCÖ: Kfz-Verkehr ist in Österreich seit 1990 massiv gestiegen“, <https://www.vcoe.at/news/details/vcoe-kfz-verkehr-ist-in-oesterreich-seit-1990-massiv-gestiegen> (23.08.2019).
- VCÖ, 2017a, „VCÖ: Vier von zehn Autofahrten der Österreicher sind kürzer als fünf Kilometer“, <https://www.vcoe.at/presse/presseaussendungen/detail/vcoe-vier-von-zehn-autofahrten-der-oesterreicher-sind-kuerzer-als-fuenf-kilometer> (22.11.2019).
- VCÖ, 2017b, „Warum können wir statt dem E-Auto mit Akku nicht auf den Durchbruch von Brennstoffzelle oder Treibstoffen aus Wasserstoff warten?“, <https://www.vcoe.at/service/fragen-und-antworten/Warum-nicht-auf-brennstoffzelle-oder-treibstoffe-aus-wasserstoff-warten> (28.06.2019).
- von Hohnhorst, M., 2018, „Die Elektrifizierung der Mobilität: Warum die Zukunft elektrisch fahren wird—und das schneller, als man denkt“, Medium, <https://medium.com/@lukasvh/die-elektrifizierung-der-mobilit%C3%A4t-warum-die-zukunft-elektrisch-fahren-wird-und-das-schneller-e21e0d98a5f6> (06.05.2019).

Werner, R., 2012, „Verbrennungsmotoren“, Bayerischer Rundfunk,
<https://www.br.de/fernsehen/ard-alpha/sendungen/schulfernsehen/verbrennungsmotor-benzin-diesel102.html>
(29.04.2019).

Wertpapiergeschichte, 2017, „Die Erfindung des Verbrennungsmotors“,
<https://wertpapiergeschichte.wordpress.com/2017/01/18/die-erfindung-des-verbrennungsmotors/> (29.04. 2019).