dena
Deutsche Energie-Agentur

STUDIE IM AUFTRAG DES BMWI

Pkw-Antriebe für die Zukunft: Ökonomische, ökologische und technische Effizienz im Vergleich

Impressum

Herausgeber
Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel: +49 (0)30 66 777-0
Fax: +49 (0)30 66 777-699
E-Mail: info@dena.de
Internet: www.dena.de

Autoren
Bojan Jander, BIT GmbH
Mohamad Said El Nakschabandi, BIT GmbH
Enes Embia Yesilyurt, BIT GmbH

Valentin Zinnecker, dena

Dr. Cornelius Moll, Fraunhofer ISI
Steffen Link, Fraunhofer ISI
Lara Schneider, Fraunhofer ISI

Review
Valentin Zinnecker, dena
Norman Wendt, dena

Prof. Dr. Martin Wietschel, Fraunhofer ISI
PD. Dr. Patrick Plötz, Fraunhofer ISI

Alex auf der Maur, Prognos AG
Hinrich Helms, ifeu

Redaktion
Valentin Zinnecker, dena

Auftraggeber
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Stand: 03/2021
Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.

Diese Publikation wurde erstellt mit freundlicher Unterstützung durch









Inhalt

Impressum **2**

Zusammenfassung **6**

1 Einleitung **8**

2 Methodik und Daten **9**

2.1 Lebenszyklusanalyse 9

2.2 TCO-Methodik 10

2.2.1 TCO-Methodik für Privat- und Flottennutzer 10

2.2.2 TCO-Methodik für Dienstwagennutzer 11

2.3 Grundannahmen und Rahmenbedingungen 12

2.3.1 Pkw-Typen 12

2.3.2 Nutzertypen 14

2.3.3 Energieszenario 16

2.3.4 Referenzfahrzeuge 23

2.4 Ökonomische Parameter 29

2.4.1 Allgemeine ökonomische Parameter 29

2.4.2 Anschaffungskosten Fahrzeug und Restwertbestimmung 30

2.4.3 Anschaffungskosten Ladeinfrastruktur PHEV und BEV 39

2.4.4 Fixe Kostenparameter 40

2.4.5 Wartungskosten 42

2.4.6 Energieträgerkosten 45

2.5 Ökologische Parameter 54

2.5.1 Fahrzeugherstellung 54

2.5.2 Energieträgerherstellung 56

2.5.3 Fahrenergie 57
2.5.4 Wartung 57
2.5.5 Entsorgung 58
2.6 Technische Parameter 59
2.6.1 Fahrzeugherstellung 59
2.6.2 Energieträgerherstellung 61
2.6.3 Fahrenergie 62
2.6.4 Wartung 62
2.6.5 Entsorgung 63
3 Ergebnisse 65
3.1 Ergebnisse der ökonomischen Betrachtung 65
3.1.1 Basisszenario 65
3.1.2 Szenario 1: Batteriepreisanpassung 73
3.1.3 Szenario 2: ohne Subventionen, Abgaben und Steuern 75
3.2 Ergebnisse der ökologischen Betrachtung 80
3.2.1 Antriebsvergleich 81
3.2.2 Vergleich ausgewählter Fahrzeugantriebe für verschiedene Anschaffungsjahre 83
3.2.3 Vergleich der THG-Emissionen in Abhängigkeit der Hybridisierung 86
3.2.4 Vergleich Nutzertypen 88
3.2.5 Vergleich der Zusammensetzung 89
3.2.6 Zusammenfassung der ökologischen Betrachtung 91
3.3 Ergebnisse der technischen Betrachtung 92
3.3.1 Antriebsvergleich 92
3.3.2 Vergleich ausgewählter Fahrzeugantriebe für verschiedene Anschaffungsjahre 95
3.3.3 Vergleich des Primärenergiebedarfs in Abhängigkeit der Hybridisierung 98

3.3.4 Vergleich Nutzertypen 99

3.3.5 Vergleich der Zusammensetzung 101

3.3.6 Zusammenfassung der technischen Betrachtung 103

3.4 Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz 104

4 Diskussion ausgewählter Aspekte 109

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 111

6 Anhang 114

Abbildungsverzeichnis 127

Tabellenverzeichnis 132

Literaturverzeichnis 134

Abkürzungen 145

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie ermittelt mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse sowie einer Gesamtkostenrechnung aus Nutzersicht die ökologische, technische und ökonomische Effizienz verschiedener Antriebsformen und Kraftstoffe für Personenkraftwagen. Hierfür werden über den Lebenszyklus von der Herstellung, über die Nutzung und das End-of-Life das Treibhausgaspotential [gCO_{2e}] im Rahmen der ökologischen Effizienz und der Primärenergiebedarf [MJ] für die technische Effizienz bestimmt. Die ökonomische Effizienz basiert auf den Gesamtkosten [EUR] der Fahrzeugnutzung aus Nutzersicht. Im Vordergrund steht die Frage nach der ökonomischen Effizienz unter Einhaltung der Klimaziele bzw. einer bestmöglichen ökologischen und technischen Effizienz.

Zu den untersuchten Fahrzeugantriebsformen gehören die konventionellen Benzin- und Dieselantriebe, Gasantriebe sowie leicht elektrifizierte Mild- und stark elektrifizierte Mischantriebe wie Full- und Plug-In-Hybrid-Antriebe. Rein elektrische Antriebe, zu denen Brennstoffzellen- und batterieelektrische Antriebe zählen, werden ebenso der Analyse unterzogen.

Es erfolgt eine Analyse verschiedener Nutzertypen wie Privatnutzer, Dienstwagennutzer und gewerblicher Flottennutzer sowie verschiedener Fahrzeugsegmente, welche sich vom Kleinwagen über die Kompaktklasse bis hin zu großen SUVs erstreckt. Ausgehend von einer Betrachtung des Ist-Zustandes im Jahr 2020 wird mit Hilfe einer breit angelegten Literaturstudie eine Szenarioberechnung für die beiden Anschaffungsjahre 2030 und 2040 durchgeführt. Die Einhaltung der Klimaziele ist bei dieser Szenariobetrachtung als Rahmenbedingung gesetzt. Die Prognose beinhaltet zum einen die technologische Weiterentwicklung der Fahrzeugantriebe hinsichtlich ihres Wirkungsrades. Zum anderen werden die für eine Dekarbonisierung erforderlichen Beimischungen biogener und strombasierter Kraftstoffkomponenten sowie eine zunehmende Dekarbonisierung der Stromerzeugung berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass es einen wesentlichen Einfluss des Nutzerprofils sowie der Fahrzeuggröße und -masse auf die ökologische, technische und ökonomische Effizienz gibt. Es zeigt sich, dass batterieelektrische Fahrzeuge sowohl bezüglich der ökologischen, technischen als auch der ökonomischen Effizienz aus Verbrauchersicht im Kleinwagen- und Kompaktklassesegment zum aktuellen Zeitpunkt den günstigsten Antrieb stellen. Auf Grund des hohen Wirkungsgrades dieser Antriebsform kann der heute noch hohe CO_2-Emissionsfaktor der Stromherstellung und die Klimalast der Batterieherstellung überkompensiert werden, sodass die ökologische Effizienz (Treibhausgasbilanz) im Vergleich insbesondere zu den konventionellen Antrieben signifikant höher ausfällt. Auf Grund der ökonomischen Anreize, die durch den Gesetzgeber beim Kauf batterieelektrischer Fahrzeuge gesetzt wurden, bieten diese aus Endkundensicht auch ökonomisch die beste Lösung ab. Dies gilt für alle Nutzertypen und ist bei gewerblichen Fahrzeugen und Dienstwagen durch die eine höhere Fahrleistungen gegenüber den Privatnutzern stärker ausgeprägt. Bei den SUV-Fahrzeugen bleibt der Vorteil batterieelektrischer Antriebe in der technischen und ökologischen Effizienz erhalten, jedoch sind diese wirtschaftlich kaum konkurrenzfähig. Gleiches gilt in diesem Segment für stark elektrifizierte Vollhybride (kombinierter verbrennungsmotorischer und elektrischer Antriebsstrang, ohne externe Lademöglichkeit). Weiterhin weisen SUV-Fahrzeuge erheblich größere Treibhausgasemissionen auf, sind über die gesamte Lebensdauer deutlich kostenintensiver und benötigen darüber hinaus auch eine deutlich größere Primärenergiemenge über die Lebensdauer.

Fahrzeuge mit Gasantrieb stellen zum Betrachtungszeitpunkt 2020 ebenfalls eine sinnvolle Lösung hinsichtlich der Treibhausgasemissionen und der Gesamtkosten dar, insbesondere für das SUV-Segment und insbesondere gegenüber konventionellen Diesel und Benzinern. Die positive Klimabilanz lässt sich bei diesem Antrieb auf einen hohen Biogasanteil zurückführen, der per Zertifikat zugerechnet und nicht physisch beigemischt wird. Weiterhin steht nachhaltige Biomasse nur in begrenzten Mengen zur Verfügung und reicht nur, um einen Teil der Pkw-Flotte abzudecken. Allerdings liegt der Primärenergiebedarf signifikant über dem für ein batterieelektrisches Fahrzeug aber auch über dem für andere konventionelle Antriebe. Hybridisierte Antriebe bieten nur einen geringen ökologischen Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen und liegen bzgl. der technischen und ökonomischen Effizienz auf dem Niveau der konventionellen Antriebe. Mit steigender Hybridisierung, unter anderem im Fall Plug-In Hydrid, nähern sich die Ergebnisse entsprechend denen von batterieelektrischen Antrieben an. Brennstoffzellenfahrzeuge stellen unter den heutigen Gegebenheiten und dem gesetzten Rahmenszenario mit einer Wasserstoffproduktion in Deutschland weder ökologisch, technisch noch ökonomisch eine effiziente Antriebsoption dar.

Künftig verringern sich die ökologischen und ökonomischen Unterschiede zwischen den Antrieben deutlich. Auf Grund der Dekarbonisierung sämtlicher Energieträger können auch die mit Verbrennungsmotor ausgestatteten Antriebe unter Nutzung erneuerbar hergestellter biologischer oder synthetischer Kraftstoffe eine klimaschonendere, ökologische Gesamtbilanz aufweisen. Auf Grund des hohen Energiebedarfs zur Herstellung biogener und strombasierter Kraftstoffe, bilden diese jedoch einen hohen Primärenergiebedarf über die Lebensdauer ab. Weiterhin ist der Energieträgerpreis für synthetische Kraftstoffe im Vergleich zu den anderen Alternativen sehr hoch. Zusätzlich sind beim Import auch politische, soziale und ökologische Nachhaltigkeitskriterien einzuhalten. Batterieelektrische Antriebe profitieren in der Zukunft zwar nichtmehr von einer Kaufpreissubventionierung, jedoch reduzieren sich die heutigen Mehrkosten signifikant, wodurch die Amortisation und ein Kostenvorteil im Verlauf der Nutzung entstehen.

Werden heutige Umlagen, Steuern, Abgaben und Subvention in der ökonomischen Betrachtung ausgenommen, bilden Gasfahrzeuge und Benziner die ökonomischsten Alternativen für 2020. Im zeitlichen Verlauf erfolgt auch hier ein Angleichen der ökonomischen Effizienz mit den bereits aufgeführten Sensitivitäten gegenüber Nutzertypen und Segmenten. Abhängig davon kristallisieren sich langfristig der Gasantrieb, der Benziner und/oder der batterieelektrische Antrieb als ökonomischste Alternativen heraus. Die ökologischen und technischen Effizienzen bleiben unberührt.

In der Gesamtheit bleibt das batterieelektrische Fahrzeug somit die effizienteste Alternative. Gegenüber dem Betrachtungszeitpunkt 2020 wird das Brennstoffzellenfahrzeug zukünftig technisch und ökologisch deutlich besser, weist auf Grund der hohen Systemkosten (Ausbau Stromerzeugung, Aufbau einer H_2-Erzeugungs- und Verteilinfrastruktur) jedoch derzeit noch deutliche ökonomische Defizite gegenüber den anderen Antriebsoptionen auf. Eine gemeinsame H2-Infrastruktur mit wasserstoffbetriebenen schweren Nutzfahrzeugen an zentralen Knotenpunkten könnte ein möglicher Hebel sein, um Synergien in der Bereitstellung und dem Unterhalt der Tankstellen nutzen zu können.

1 Einleitung

Das Ziel ist klar definiert: die Bunderepublik Deutschland soll im Jahr 2050 klimaneutral sein. In allen Sektoren sind dazu erhebliche Anstrengungen anzustellen, so auch im Verkehrssektor. Die Diskussion über den „richtigen“ Antrieb für künftige Personenkraftwagen wurde dabei in der Vergangenheit oftmals leidenschaftlich und teilweise aus stark ideologischem Blickwinkel geführt. So wird auf der einen Seite mit hohen Anschaffungskosten für batterieelektrische Fahrzeuge sowie geringen Reichweiten ebendieser Fahrzeuge argumentiert. Auf der anderen Seite werden die konventionellen Antriebe meist mit hohen direkten Treibhausgasemissionen in Verbindung gebracht. Dabei gilt es, verschiedene Anforderungen an Fahrzeugantriebe für Pkw zu berücksichtigen. Zum einen sollen Fahrzeuge umweltfreundlicher werden, zum anderen dürfen die für den Nutzer anfallenden Kosten nicht vernachlässigt werden, denn die Gesamtnutzungskosten spielen – vor allem für gewerbliche Halter – neben den reinen Anschaffungskosten nach wie vor eine zentrale Rolle bei der Anschaffung und im Betrieb eines Fahrzeuges.

Ziele dieser Studie ist es daher, einen ganzheitlichen, transparenten und fairen Effizienzvergleich unterschiedlicher Fahrzeugantriebe in ökologischer, ökonomischer und technischer Hinsicht aus Endkundenperspektive durchzuführen. Unter dem Effizienzbegriff wird in dieser Studie verstanden, wie Vorteilhaft die unterschiedlichen Antriebsoptionen im direkten Vergleich miteinander abschneiden. Auf Basis einer Lebenszyklus- sowie einer daran gekoppelten Gesamtkosten-Analyse werden verschiedene Fahrzeugantriebe von konventionellen über Hybridantriebe bis hin zu batterieelektrischen und Brennstoffzellenantrieben bezüglich ihrer über den gesamten Lebenszyklus anfallenden Treibhausgasemissionen, der für die Herstellung, den Betrieb und der Entsorgung benötigten Primärenergiemenge sowie der Gesamtkosten während der Haltedauer analysiert und bewertet. Neben der Betrachtung der verschiedenartigen Antriebsausprägungen werden zusätzlich verschiedene Nutzerprofile von privat, über gewerbliche Flottennutzer bis hin zur Nutzung als Dienstwagen in die Betrachtung mit einbezogen. Um das Gesamtbild noch zu erweitern, erfolgt darüber hinaus eine Analyse verschiedener Fahrzeugsegmente, um die drei durch die Verkaufszahlen am stärksten vertretenden Klassen Klein- und Kompaktwagen sowie Fahrzeuge aus der Klasse der großen SUV abbilden zu können. Durch die Kombination von Fahrzeugsegmenten und Nutzertypen wird eine hohe Abdeckung der in Deutschland zum Einsatz kommenden Fahrzeuge erreicht. Beginnend mit einer Analyse der Ist-Situation auf Basis der heute am Markt befindlichen Fahrzeuge wird eine Projektion der Treibhausgasemissionen, des Primärenergiebedarfs sowie der Gesamtkosten in das Jahr 2030 und 2040 vorgenommen, um dem Nutzer eine Entscheidungshilfe auch für die Zukunft anbieten zu können. Für die Projektionen in die Zukunft wird zum einen die voraussichtliche Entwicklung der technischen Effizienz der Antriebe sowie der Herstellungsprozesse der jeweiligen Energieträger berücksichtigt. Weiterhin werden Entwicklungen bzgl. der Dekarbonisierung der Energieträger die damit einhergehenden Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen, Primärenergiebedarf und Kosten abgebildet. Den Abschluss bildet ein Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz, welcher die zuvor diskutierten Teilaspekte inkludiert und einen gesamtheitlichen Direktvergleich der Antriebsformen ermöglicht.

2 Methodik und Daten

2.1 Lebenszyklusanalyse

Zur Bestimmung der ökologischen, ökonomischen und technischen Effizienz wird der methodische Ansatz der Lebenszyklusanalyse (engl. Life-Cycle Assessment = LCA) angewandt. Unter Verwendung dieser Methode werden für jeden Lebensabschnitt des Fahrzeuges die entstehenden Kohlendioxidemissionen, der Primärenergiebedarf sowie die anfallenden Kosten ermittelt. Die Gesamtbilanz berechnet sich durch Addition der Lebensabschnitte. Eine schematische Darstellung der LCA wird durch Abbildung 1 gegeben.

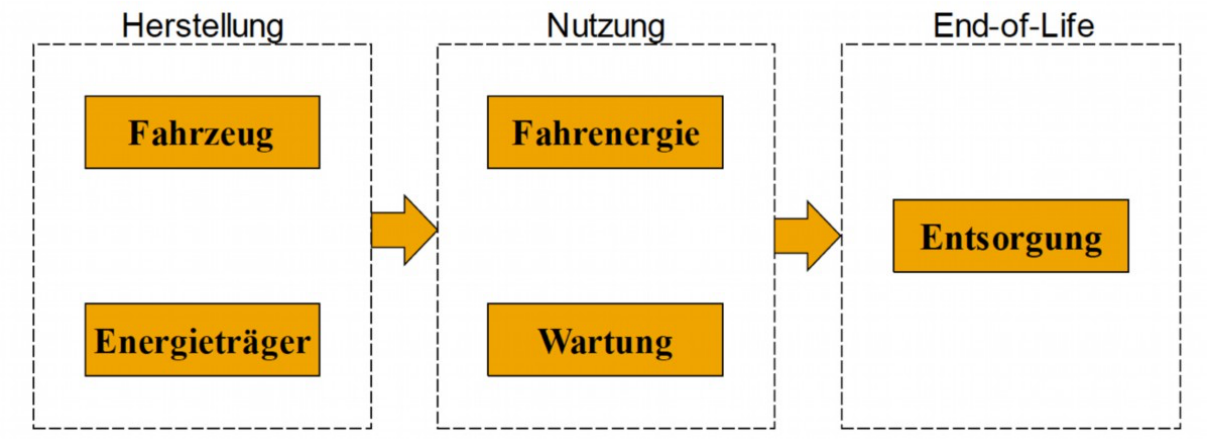


Abbildung 1 - Lebenszyklusanalyse

Herstellung

Unter der Herstellung werden alle Arbeitsschritte verstanden, die für die Produktion des Fahrzeuges sowie die Erzeugung und Bereitstellung der Energieträger notwendig sind. Dazu zählt die Gewinnung und der Transport von Rohstoffen wie Aluminium oder Eisen, die Weiterverarbeitung zu Stahl und weiteren Verarbeitungsschritten zu Halbzeugen (z. B. Stahlprofile) ebenso wie die Verarbeitung zum verkaufsfertigen Produkt etwa in einem Produktionsstandort eines Automobilherstellers. Gleiches gilt für den Energieträger. Auch hier wird der Abbau des Rohstoffs, die Weiterverarbeitung beispielsweise in einer Raffinerie und der Transport zum Bereitstellungsort etwa mit Hilfe von Tankschiffen, Pipelines und Lkw an eine Tankstelle berücksichtigt.

Bei der Berechnung der für die Herstellung des Fahrzeuges entstehenden CO_2-Emissionen sowie des Primärenergiebedarfs wurde das Fahrzeug in drei Baugruppen Rumpf, Antrieb und Speicher unterteilt. Es wurde zunächst das batterieelektrische Fahrzeug einer jeden Fahrzeugklasse als Referenz herangezogen und über die Batteriekapazität und eine durchschnittliche gravimetrische Energiedichte von X_{Bat} = 125 Wh/kg die Masse der Traktionsbatterie bestimmt. Aus dem Datenpool von (ecoinvent 2020) wurde in Abhängigkeit von der verbauten Antriebsleistung die Masse für den Antrieb bestimmt. Anschließend wurde durch Subtraktion der Batterie- und Antriebsmasse (sowohl Verbrennungsmotor als auch Elektromotor) die Rumpfmasse bestimmt. Diese wurde dann für alle Antriebsarten genutzt und über die Herstellungsjahre konstant gehalten.

Nutzung

Unter der Nutzung wird der Lebensabschnitt des Fahrzeuges verstanden, der beim Nutzer (Anwender) des Fahrzeuges stattfindet. Dazu zählt neben dem Fahrenergiebedarf und den dabei entstehenden Emissionen und Kosten auch der Anfall von Kohlendioxid, Energiebedarf und Kosten bei der Wartung des Fahrzeuges. Das Nutzungsverhalten verschiedener Nutzertypen wird in Kapitel 2.3.2 erläutert.

End-Of-Life

Unter End-of-Life werden alle Arbeitsschritte verstanden, die nach der Nutzung des Fahrzeuges durch den Nutzer stattfinden. In der hier durchgeführten Studie wird dabei lediglich die Entsorgung betrachtet. Es wird dabei das Cut-Off-Prinzip berücksichtigt. "Der Cut-off-Ansatz berücksichtigt für Primärmaterialien die vollen Umweltlasten der Materialvorkette, für Sekundärmaterialien dagegen gar keine Umweltlasten. Stattdessen trägt der Nutzer die vollen Umweltlasten der Abfallbehandlung, nicht jedoch für das Recycling, da er auch keine Gutschrift für die wiedergewonnenen Materialien erhält.“ (Helms et al. 2019b)

2.2 TCO-Methodik

Für die Bewertung der ökonomischen Effizienz der Antriebe und Kraftstoffe wird eine Total Cost of Ownership (TCO) Berechnung durchgeführt. Wie in Kapitel 2.3.2 dargelegt wird, werden die unterschiedlichen Pkw-Nutzertypen Privatnutzer, gewerbliche Flottennutzer und Dienstwagennutzer unterschieden. Die Berechnungsmethode für die TCO der Privat- und Flottennutzer unterscheidet sich jedoch von der Berechnungsmethode für Dienstwagennutzer. Beide Methoden werden daher im Folgenden vorgestellt.

2.2.1 TCO-Methodik für Privat- und Flottennutzer

Um die verschiedenen Antriebssysteme und Kraftstoffe hinsichtlich ihrer ökonomischen Effizienz, also Wirtschaftlichkeit, vergleichen zu können, wird eine TCO-Berechnung durchgeführt. Die TCO umfassen alle Kosten, die bei Erwerb, Nutzung und Entsorgung eines Guts, in diesem Fall von Pkw, über dessen gesamte Nutzungsdauer hinweg anfallen. Diese umfassende Vollkostenrechnung ist für einen adäquaten Vergleich verschiedener Antriebssysteme und Kraftstoffe erforderlich, da sich beispielsweise Anschaffungskosten und laufende Kosten der Alternativen teilweise deutlich unterscheiden. Eine TCO-Berechnung ermöglicht daher einen ganzheitlichen Kostenvergleich, der Endkunden einen transparenten Vergleich ermöglicht.

Im Wesentlichen lassen sich einmalige Kosten sowie von der Nutzung abhängige variable Kosten und regelmäßig wiederkehrende Fixkosten unterscheiden. Die verwendete Formel ist an Wietschel et al. (2019) angelehnt. Da eine Betrachtung aus Endkundenperspektive durchgeführt wird, werden alle Subventionen, Abgaben, Umlagen und Steuern wie Umweltbonus, Mehrwertsteuer, Energiesteuer, Stromsteuer, CO_2-Steuer und weitere in die Kosten und Preise inkludiert. Es werden als einmalige Kosten die Anschaffungskosten für das Fahrzeug F_0 zu Beginn der Nutzungsdauer T, Subventionen S_0 für elektrisch angetriebene Fahrzeuge (EV), der Restwert bzw. Wiederverkaufswert RW_T der Fahrzeuge am Ende der Nutzungsdauer sowie die jährlichen Abschreibungen für die Ladeinfrastruktur I_0 für elektrisch angetriebene Fahrzeuge über die Nutzungsdauer berücksichtigt (siehe Tabelle 1). Bei den variablen Kosten, welche von der jährlich variierenden

Jahresfahrleistung JFL_t abhängen, fließen Energieverbrauch EV, variable Faktoren zur Berücksichtigung von Ladeverlusten und Anpassungen von Normverbräuchen an die Realität RA_t, sich über die Zeit ändernde Energiepreise EP_t und Wartungs- und Reparaturkosten WK ein. Die fixen Kosten umfassen Versicherungskosten für Kfz-Haftpflicht- und Kaskoversicherung sowie die Kfz-Steuer. Alle betrachteten Kosten werden für einen adäquaten Vergleich mit ihrem jeweiligen Zeitwert bzw. Barwert berücksichtigt und daher mit dem Zinssatz i auf den Beschaffungszeitpunkt diskontiert.

$$TCO = F_0 - S_0 - \frac{RW_T}{(1+i)^T} + I_0 * T + \sum_{t=1}^{T} \frac{\overbrace{(EV * RA_t * EP_t + WK) * JFL_t}^{variable\ Kosten} + \overbrace{VK + KS}^{fixe\ Kosten}}{(1+i)^t}$$

Parameter der TCO-Berechnung	Abkürzung	Einheit
Anschaffungskosten Fahrzeug	F_0	EUR
Jährliche Dienstwagenleasing-Rate	AR	EUR
Subvention Anschaffungskosten Fahrzeug	S_0	EUR
Restwert Fahrzeug	RW_T	EUR
Jährliche Abschreibung Infrastrukturkosten	I_0	EUR
Nutzungsdauer Fahrzeug	T	Jahre
Zinssatz zur Diskontierung zukünftiger Kosten	i	%
Energieverbrauch	EV	l/km oder kWh/km
Realitätsanpassung Energieverbrauch / Ladeverluste (variabel)	RA_t	%
Energieträgerpreise (variable Prognose)	EP_t	EUR/l oder EUR/kWh
Wartungs- und Reparaturkosten	WK	EUR/km
Jahresfahrleistung (variabel)	JFL_t	km
Versicherungskosten	VK	EUR/Jahr
Kfz-Steuer	KS	EUR/Jahr

Tabelle 1 - Parameter der TCO-Berechnung sowie deren Abkürzungen und Einheiten.

2.2.2 TCO-Methodik für Dienstwagennutzer

Für die Berechnung der TCO aus Sicht eines Dienstwagennutzers wird die oben genannte Formel angepasst, da bei Dienstwagennutzern die Anschaffung bzw. das Leasing des Pkws über das Unternehmen erfolgt. In diesem Fall sind Anschaffungskosten und Restwertbetrachtungen nicht relevant, da diese lediglich aus Sicht des Unternehmens in die Betrachtung einfließen. Der Nutzer selbst sieht lediglich eine effektive Minderung des monatlichen bzw. jährlichen Nettoeinkommens. Von weiteren Mitarbeiteranreizen wie bspw. Tank- oder Stromladekarten wird in der Berechnung abgesehen. Alle weiteren laufenden Kosten für den Betrieb des Fahrzeugs bleiben analog zur oben gezeigten Methodik erhalten und sind damit vom Nutzer zu entrichten. Von einer möglichen Übernahme dieser Kosten durch die Firma wird abgesehen. Die folgende Formel fasst

die Berechnung gemäß der jährlichen Minderung des Nettoeinkommens bzw. der Rate für die Dienstwagennutzung AR (Annual Rate) zusammen:

$$TCO = \sum_{t=1}^{T} \frac{AR + \overbrace{(EV * RA_t * EP_t + WK) * JFL_t}^{variable\ Kosten} + \overbrace{VK + KS}^{fixe\ Kosten}}{(1+i)^t}$$

Für die Bestimmung der jährlichen Rate wird ein fiktiver Dienstwagennutzer angelegt. Es wird keine Fahrtenbuchregelung angenommen. Stattdessen wird die Berechnung des geldwerten Vorteils, je nach Antrieb, auf Basis der 1% Regelung durchgeführt (näheres siehe Kapitel 2.4.2). Als durchschnittlicher Bruttomonatsverdienst von vollzeitbeschäftigten Arbeitnehmern werden 3.994 Euro angesetzt (Destatis 2020). Den Autoren dieser Studie ist bewusst, dass typische Dienstwagennutzer tendenziell ein höheres Gehalt vorweisen können. Aus Mangel an repräsentativen und umfassenden Quellen wird allerdings auf den oben genannten Durchschnittsverdienst verwiesen. Als durchschnittlichen Weg zur Arbeit pro Tag werden 46 km, gemäß BMVI (2019) die durchschnittliche Tagesstrecke einer mobilen Person, herangezogen. Weitere Abgaben wie Lohnsteuer, Versicherungsbeiträge und Kirchensteuer sind im Anhang aufgeführt.

2.3 Grundannahmen und Rahmenbedingungen

2.3.1 Pkw-Typen

Für den Effizienzvergleich werden verschiedene Typen von Fahrzeugen und Antrieben definiert. Es werden zunächst die verschiedenen Antriebsarten definiert, welche für den weiteren Vergleich zum Einsatz kommen. Dazu zählen neben den **konventionellen Benzin- und Dieselantrieben** die leicht elektrifizierten **Mild-Hybride (MHEV)**, die **Full-Hybrid-Antriebe (FHEV)** sowie stark elektrifizierte, mit externe Lademöglichkeit versehene **Plug-In-Hybride (PHEV)**. Die verschiedenen Hybrid-Fahrzeuge unterscheiden sich im Wesentlichen in der installierten elektrischen Leistung, den elektrischen Funktionen sowie der rein elektrischen Reichweite. Unter Mild-Hybrid-Antrieben werden fortan leicht elektrifizierte Verbrennungsmotorische Antriebe mit einem 48V-Bordnetz verstanden, welches beispielsweise eine Stopp-Start-Automatik sowie elektrisches Segeln, Bremsenergierückgewinnung, elektrisches Boosten und elektrisches Fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten erlaubt. Die Leistung der elektrischen Maschine ist mit P_{el} = (10 bis 15) kW vergleichsweise gering. Full-Hybrid-Antriebe verfügen über eine größere elektrische Leistung, welche rein elektrisches Fahren auch bei höheren Geschwindigkeiten ermöglicht. Der Full-Hybrid-Antrieb weist darüber hinaus die gleichen Funktionalitäten wie ein Mild-Hybrid auf. Auf Grund einer vergleichsweise geringen Kapazität der Traktionsbatterie können nur geringe rein elektrische Reichweiten von weniger als 5 km realisiert werden. Plug-In-Hybrid-Antriebe weisen in der Regel den höchsten Elektrifizierungsgrad auf, bilden in dem hier betrachteten Szenario also den Mischantrieb mit der höchsten elektrischen Leistung. Eine große Batteriekapazität erlaubt zudem höhere elektrische Reichweiten von mehr als 50 km (Hofmann 2014).

Für einen umfassenden Vergleich werden zudem **Gasfahrzeuge (CNG/CBG)**, das heißt Fahrzeuge, die einen Verbrennungsmotor welcher Erd- und Biogas verbrennen kann, sowie rein **batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)** berücksichtigt. Die heute eher als Nischenanwendung zum Einsatz kommenden Wasserstoff-betriebenen **Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)** werden ebenso berücksichtigt, um diese für die Zukunft relevante Technologie in den Antriebs- und Kraftstoffvergleich mit einbeziehen zu können.

Um eine hinreichende Abdeckung der am Markt befindlichen Fahrzeuge sicherzustellen, werden anschließend die drei Fahrzeugmengte **Kleinwagen (A/B)** (z. B. VW Polo), **Kompaktklasse (C)** (z.B. VW Golf) sowie große **SUVs (J)** (z.B. BMW X5) festgelegt. Die Zuordnung der am Markt befindlichen Fahrzeuge erfolgt nach (Kraftfahrtbundesamt 2020; Weemaes). Es wurden dann die fünf meistverkauften Fahrzeuge pro Segment ermittelt und daraus jeweils ein generisches Modellfahrzeug pro Segment berechnet. Die Parameter des Modellfahrzeuges setzen sich aus Fahrzeugeigenschaften wie Fahrzeugmasse, Antriebsleistung, ggf. Batteriekapazität bzw. Tankgröße sowie Kraftstoff bzw. Stromverbrauch zusammen. Sollte es für eine Segment-Antriebs-Kombination weniger als fünf Fahrzeuge geben, so wird das Modellfahrzeug aus der Gesamtheit der verkauften Fahrzeuge gebildet.

Besonderheiten

Bei den fünf meistverkauften Fahrzeugen im SUV-Segment war keines mit CNG-Antrieb verfügbar, daher konnte aus dieser Datenlage kein Modellfahrzeug abgeleitet werden. Mit dem Ziel, diese Segment-Antriebskombination dennoch abbilden zu können, wurde ein generisches Modellfahrzeug aus den vorliegenden Daten abgeleitet. Dafür wurden die Verhältnisse der Fahrzeugparameter sowie des Kraftstoffverbrauchs von Kompakt- und SUV-Klasse gebildet und anschließend auf die Kompaktwagenklasse mit Gasantrieb angewandt.

Zum Zeitpunkt dieser Studie wurden in der Kleinwagenklasse keine Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge angeboten. Die Fahrzeugparameter wurden aus den Daten der Kompaktwagen und SUV-Klasse linear extrapoliert.

Die Fahrzeugparameter für die Mild-Hybrid-Fahrzeuge wurden durch Ermittlung der Differenz der Fahrzeugparameter zwischen konventionellen und Mild-Hybrid-Fahrzeugen, die wirklich am Markt verfügbar waren, ermittelt. Hierzu zählen beispielsweise der Ford EcoBoost (Hybrid) sowie der VW Golf (e)TSI. Diese Differenzen wurden anschließend auf den aus den fünf meistverkauften Fahrzeugen ermittelten arithmetischen Mittelwerten der konventionellen Fahrzeuge aufgerechnet und so ein generisches MHEV erzeugt.

Die Fahrzeugparameter der Full-Hybrid-Fahrzeuge wurden ebenfalls über eine Differenzbildung der Benzin- und Full-Hybridfahrzeuge eines jeden Segments bestimmt. Zunächst wurde dafür in jedem Segment das arithmetische Mittel aller im Segment verfügbaren Full-Hybride berechnet. Anschließend wurde für jedes Segment dieses Modellfahrzeug mit seinen Eigenschaften von dem Segment-spezifischen Benzin-Referenzfahrzeug subtrahiert und die drei Differenzen anschließend wieder arithmetisch gemittelt. Diese Differenz wurde dann auf die jeweiligen Benzin-Referenzmodelle aufgerechnet. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da es extrem große Unterschiede bei der technischen Ausführung der Full-Hybride in den einzelnen Klassen gibt, und die gewählte Vorgehensweise diesen Sachverhalt bereinigen kann. Gleichzeitig war die Kraftstoffreduktion unter allen Segmenten vergleichbar.

Auf Grund der hohen Systemkosten werden Diesel-Full- und Plug-In-Hybridantriebe (hohe Kosten für den Diesel-Verbrennungsmotor) sowie Hybridisierungsstufen eines CNG-Fahrzeuges (hohe Kosten sowie hohe Masse für das Tanksystem) in dieser Studie nicht betrachtet.

Künftige Antriebskonfigurationen

Für die Betrachtungszeitpunkte 2030 und 2050 ergeben sich einige Änderungen in der Antriebsmatrix. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass Verbrennungsmotoren immer mindestens mild-hybridisiert sind. Die rein konventionellen Fahrzeugantriebe entfallen damit.

2.3.2 Nutzertypen

Die zuvor dargestellten Segment-Antriebskombinationen werden für verschiedene Haltegruppe charakterisiert. Es wird im Folgenden zwischen privaten, gewerblichen Nutzern sowie Dienstwagennutzern unterschieden. Die Nutzergruppe unterscheiden sich zum einen in der Haltedauer der Fahrzeuge, zum anderen weisen diese zusätzlich unterschiedliche Jahresfahrleistungen auf. Darüber hinaus weisen auch die verschiedenen Fahrzeugsegmente unterschiedliche Jahresfahrleistungen auf. Privatnutzer nutzen ihr Fahrzeug lediglich für den Privatgebrauch, steuerliche Vorteile können entsprechend nicht genutzt werden. Gewerblich genutzte Fahrzeuge werden ausschließlich für dienstliche Fahrten genutzt, dazu gehören beispielsweise Flottenfahrzeuge. Dienstfahrzeuge werden sowohl für gewerbliche Zwecke als auch im Privaten durch einen Nutzer genutzt. Die Nutzer können steuerliche Vorteile nutzen, was für die weitere ökonomische Betrachtung von Bedeutung ist. Auf Grund der Nutzung sowohl im dienstlichen Umfeld als auch im Privaten ergibt sich für die Dienstwagen-Klasse eine im Vergleich zu den anderen Nutzern hohe Jahreslaufleistung.

		Lebensdauer (in Jahren)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	∑
Segment	Nutzer	Laufleistung (in Tausend Kilometern, gerundet)															
Klein-wagen	Privat	15	14	13	12	12	11	11	10	10	9	9	8	8	8	7	157
	Dienstw.	30	29	27													201
	Gewerbe	17	16	15	15	14											168
Kompaktklasse	Privat	17	17	16	15	14	13	13	12	11	11	10	10	10	9	9	187
	Dienstw.	36	35	33													241
	Gewerbe	34	32	31	19	18											242
SUVs	Privat	20	19	18	17	16	15	14	14	13	12	12	11	11	10	10	212
	Dienstw.	41	39	37													272
	Gewerbe	21	20	19	18	17											217

Tabelle 2 - Jahresfahrleistung , Lebensdauer und Nutzungsdauer verschiedener Nutzertypen und Fahrzeugsegmente

Tabelle 2 zeigt die Jahresfahrleistung der verschiedenen Nutzertypen und Fahrzeugsegmente in Tausend km. Es ist zudem die Gesamtfahrleistung dargestellt. Für die ökonomische Betrachtung ist die Haltedauer von Bedeutung, welche für Dienstwagenfahre mit drei Jahren, für Gewerbefahrzeuge mit fünf Jahren und für die private Nutzung mit sieben Jahren modelliert wird. Die Berechnung der kumulierten THG-Emissionen sowie des Primärenergiebedarfs im Lebenszyklus erfolgt stets anhand der Lebensdauer von 15 Jahren. Für

das Dienstwagenfahrzeug wird ab dem vierten Lebensjahr davon ausgegangen, dass dieses als Fahrzeug in Privatnutzung weiterverwendet wird. Gleiches gilt für das Gewerbefahrzeug ab dem sechsten Jahr.

Typische Ladeorte und Ladeleistungen (ISI)

Im Folgenden werden typische Ladeorte und Ladeleistungen für BEV und PHEV spezifiziert. Dies ist erforderlich, da hier jeweils unterschiedliche Strompreise sowie unterschiedliche Ladeverluste zum Tragen kommen.

Die wichtigsten Ladeorte für die verschiedenen Nutzertypen sind das Laden zu Hause, beim Arbeitgeber, an öffentlichen Normalladesäulen (AC-Laden), an öffentlichen Schnellladesäulen (DC-Laden) sowie an öffentlichen Hochleistungsladesäulen (High Power Charging = HPC) (Scherrer et al. 2019; Auf der Maur et al. 2020).

Aufbauend auf der Erhebung von Scherrer et al. (2019) wurden vertiefte Analysen durchgeführt, um die Verteilung der Ladevorgänge der Nutzertypen (privat, gewerblich, dienstlich) und Antriebsalternativen (BEV, PHEV) auf die verschiedenen Ladeorte vornehmen zu können. In der Erhebung werden Privatnutzer und Dienstwagennutzer unterschieden. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde daher angenommen, dass Flottennutzer grundsätzlich dasselbe Ladeverhalten aufweisen wie Dienstwagennutzer, lediglich mit dem Unterschied, dass Flottennutzer den Pkw nicht zuhause laden. Entsprechend wurde der Anteil des Zuhause-Ladens gleichmäßig auf die anderen Ladeorte verteilt. Weiterhin wird angenommen, dass sich im Rahmen der Erhebung erfasstes öffentliches Schnellladen hälftig in DC- und HPC-Laden aufteilt.

Bei PHEV-Nutzern wird angenommen, dass deren Ladeverhalten auch in Zukunft gleichbleibt, da ein vermehrtes öffentliches Laden aufgrund des zweiten Antriebs nicht erforderlich und in der Regel deutlich teurer ist (siehe Kapitel 2.4.6). Eine entsprechende Wallbox sowie deren feste Installation sind daher kostenseitig bei der Anschaffung berücksichtigt. Bei BEV-Nutzern wird für 2020 das durchschnittliche Ladeverhalten von BEVs aller Reichweiten in der Erhebung von Scherrer et al. (2019) herangezogen. Aufgrund steigender BEV-Reichweiten wird ab 2025 ausschließlich das Ladeverhalten von BEVs in der Erhebung mit einer Reichweite von mehr als 300km herangezogen. Zwischen 2020 und 2025 wird eine lineare Entwicklung angenommen. Ab 2025 werden keine Veränderungen mehr angenommen. Dies ist vor allem damit zu begründen, dass eine weitere Zunahme von öffentlichem Laden gegenüber Zuhause-Laden und Arbeitgeber-Laden vor dem Hintergrund der höheren Kosten und nicht zuletzt der Wohnungsinfrastruktur in Deutschland nicht plausibel erscheint. Denn 76% aller Pkw in Deutschland werden regelmäßig in einer festen Garage oder in einem festen Carport oder auf einem festen Stellplatz auf einem Privatgrundstück geparkt (Gnann 2015; BMVI 2019). Weitere 5% der Pkw werden regelmäßig in einem Parkhaus oder einer Tiefgarage und lediglich 18% im öffentlichen Straßenraum geparkt (sogenannte „Laternenparker“). Ein Großteil der privaten Ladevorgänge wird also auch zukünftig zuhause bzw. an festen Stellplätzen stattfinden. Auch das Arbeitgeberladen wird einen hohen Anteil beibehalten, da der Anreiz aufgrund der sehr günstigen Strompreise für Gewerbe und Industrie, welche an den Arbeitnehmer ohne Anrechnung eines geldwerten Vorteils weitergegeben werden dürfen, sehr hoch ist. Die Verteilung der Ladeorte von PHEV und BEV aktuell sowie ab 2025 ist in Abbildung 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass Privatnutzer zu 75% zuhause und beim Arbeitgeber laden. Dienstfahrzeug- und Flottenfahrzeugnutzer hingegen laden aktuell überwiegend beim Arbeitgeber. Künftig gewinnt öffentliches Laden etwas mehr Gewicht, vor allem bei Dienstfahrzeug- und Flottenfahrzeugnutzern. Jedoch liegt der Anteil von Zuhause- und Arbeitgeberladen immer noch bei mindestens zwei Dritteln.

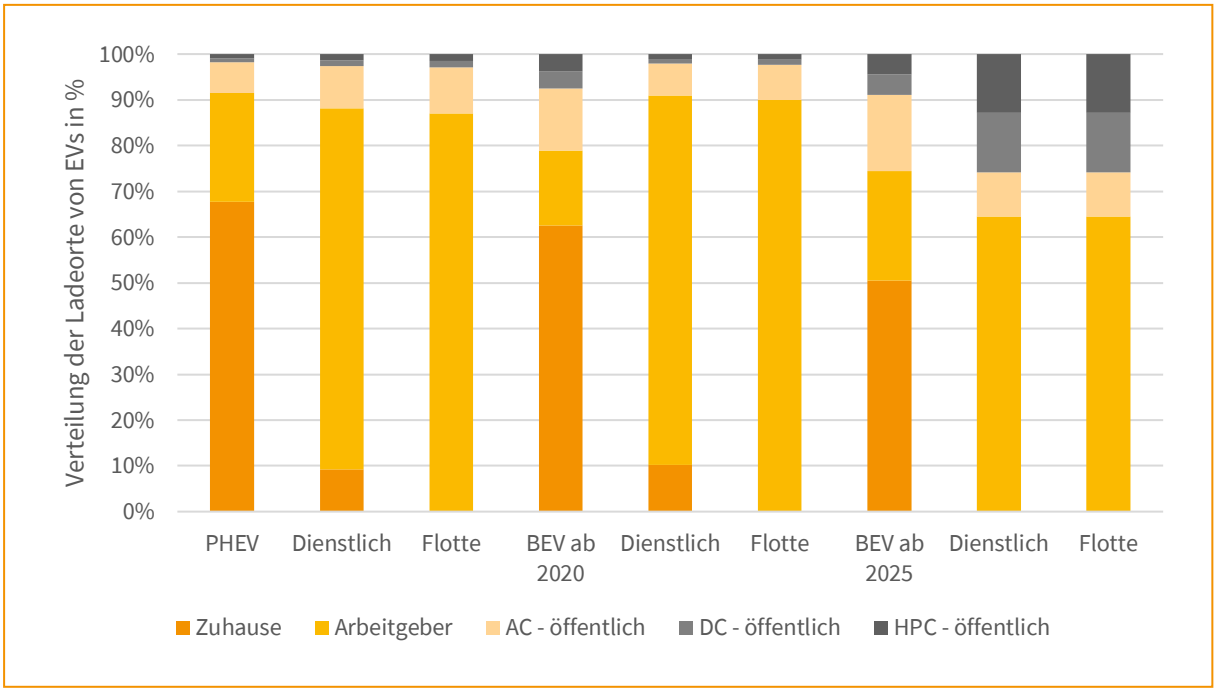


Abbildung 2 - Verteilung der Ladeorte von EVs und unterschiedlichen Nutzertypen. Quelle: Eigene Auswertung auf Basis der Erhebung von Scherrer et al. (2019)

Als Ladeleistung für das Heimladen werden über den kompletten Betrachtungszeitraum hinweg 11 kW angenommen. Zunächst ist festzuhalten, dass für den Standardfall, Laden über Nacht, auch bei stark zunehmenden Batteriekapazitäten eine Ladeleistung von 11 kW ausreichend sein wird, um das Fahrzeug voll aufzuladen und dass die Bezuschussung von privat installierten Wallboxen an eine Beschränkung auf 11 kW Ladeleistung, vor allem zur Schonung der Verteilnetze, gebunden ist. Weiterhin folgt diese Annahme der Prognose der NPM (2020a), dass künftig die meisten E-Fahrzeuge über eine Ladeleistung von 11 kW verfügen werden. Für öffentliches Normal- bzw. AC-Laden, also für sogenannte „Laternenparker“ und beispielsweise das Laden auf Parkplätzen von Einzelhändlern, wird in Anlehnung an Auf der Maur et al. (2020) eine Ladeleistung von 22 kW angenommen. Diese wird auch für das Laden beim Arbeitgeber und damit auch Laden gewerblicher Flotten übernommen. Aus gewerblicher Sicht liegen Gründe hierfür in der Sicherstellung einer hohen Fahrzeugverfügbarkeit oder auch im Laden mehrerer Fahrzeuge (Köstlinger 2020). Für öffentliches DC-Laden werden 50 kW Ladeleistung angenommen, für öffentliches HPC bis zu 300 oder 350 kW Ladeleistung (Auf der Maur et al. 2020; NPM 2020a).

2.3.3 Energieszenario

Um einen einheitlichen Rahmen für die weiteren Analysen nutzen zu können, wurden Grundannahmen und Rahmenbedingungen hinsichtlich der künftigen Verbreitung von Antriebsalternativen, der Entwicklung von CO_2-Emissionen im Energiesystem, der Beimischung von alternativen Kraftstoffen sowie der Entwicklung von Energiekosten und -preisen an ein bestehendes Energieszenario angelehnt.

Zur Auswahl einer geeigneten Studie bzw. eines geeigneten Energieszenarios wurden zahlreiche Energiesystemanalysen anerkannter Institutionen untersucht und verglichen. Als Bewertungskriterien wurden das Jahr (Aktualität), Betrachtungszeitraum (2020 bis 2050), Minderungsziele (Ziele des Klimaschutzplans bis 2030, 80-95% Reduktion bis 2050), Spezifizierung der Energieträgerkosten und der

spezifischen CO_2-Emissionen von Strom sowie die Berücksichtigung aktueller Politikinstrumente herangezogen. Es wurden beispielsweise die Langfristszenarien des Fraunhofer ISI et al. (2017a), die Klimapfade für Deutschland von BCG und Prognos AG (2018, 2019), die Leitstudie der dena (2018), die Rescue-Studie des UBA (2019) sowie weitere Studien (Prognos AG et al. 2020b; UBA 2020) berücksichtigt.

Aufgrund der Aktualität, der validen modellgestützten Ergebnisgewinnung und der umfassenden Berücksichtigung verschiedener aktueller Politikinstrumente wird Prognos AG et al. (2021) herangezogen. Prognos hat gemeinsam mit dem Fraunhofer ISI, der GWS und dem iinas eine umfassende Szenarienanalyse zum deutschen Energiesystem für das BMWi durchgeführt. Die Grundannahmen und Rahmenbedingungen für die vorliegende Studie werden daher an Prognos AG et al. (2021) angelehnt. Aufgrund der guten Passfähigkeit wurde das Zielszenario 1 herangezogen, wobei zusätzlich aktualisierte politische Vorgaben berücksichtigt wurden (z.B. bei der Höhe der CO_2-Lenkungsabgabe). Folgende Ziele stehen im Zielszenario 1 im Vordergrund:

- annähernde Erreichung der Klimaziele, auch im Verkehr, bis 2030, gemäß Klimaschutzprogramm
- Reduktion der THG-Emissionen im Verkehr bis 2050 97,5%.
- Reduktion der sektorübergreifenden THG-Emissionen bis 2050 um 85%

Als wesentliche Instrumente zur Erreichung der Klimaziele im Verkehr bis 2030 werden im Zielszenario 1 folgende Instrumente berücksichtigt:

- CO_2-Lenkungsabgabe steigt auf EUR_{2016} 180 je Tonne CO_2 im Jahr 2030 an
- Bonus-Malus System für Pkw mit einem Malus bis zu EUR 10.000 für Hochemissionsfahrzeuge (>250 gCO_2/km) (im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt)
- Abschaffung der Entfernungspauschale (im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt)
- Beimischungsquoten für biogene sowie strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe (Power-to-Liquid - PtL):
  - Steigerung auf 10% bei Bioethanol und Biodiesel bis 2030
  - Steigerung auf 80% beim Biogas bis 2030
  - Beimischung von PtL bis 2030 bei rund 4%

Entwicklung des Pkw-Bestands und des Energiebedarfs

Die Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antrieben gemäß Zielszenario 1 ist in Abbildung 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass BEV eine immer größere Rolle spielen und ab 2040 die am weitesten verbreitete Antriebsart darstellen. Nennenswerte Anteile entfallen auch auf Gasantriebe und PHEV. FCEV spielen bis 2050 kaum eine Rolle. Unter Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV) sind sowohl diesel- als auch benzingetriebene Pkw zusammengefasst. Ihr Anteil im Pkw-Bestand nimmt immer weiter ab. Bis 2050 sind sie fast aus dem Bestand verschwunden.

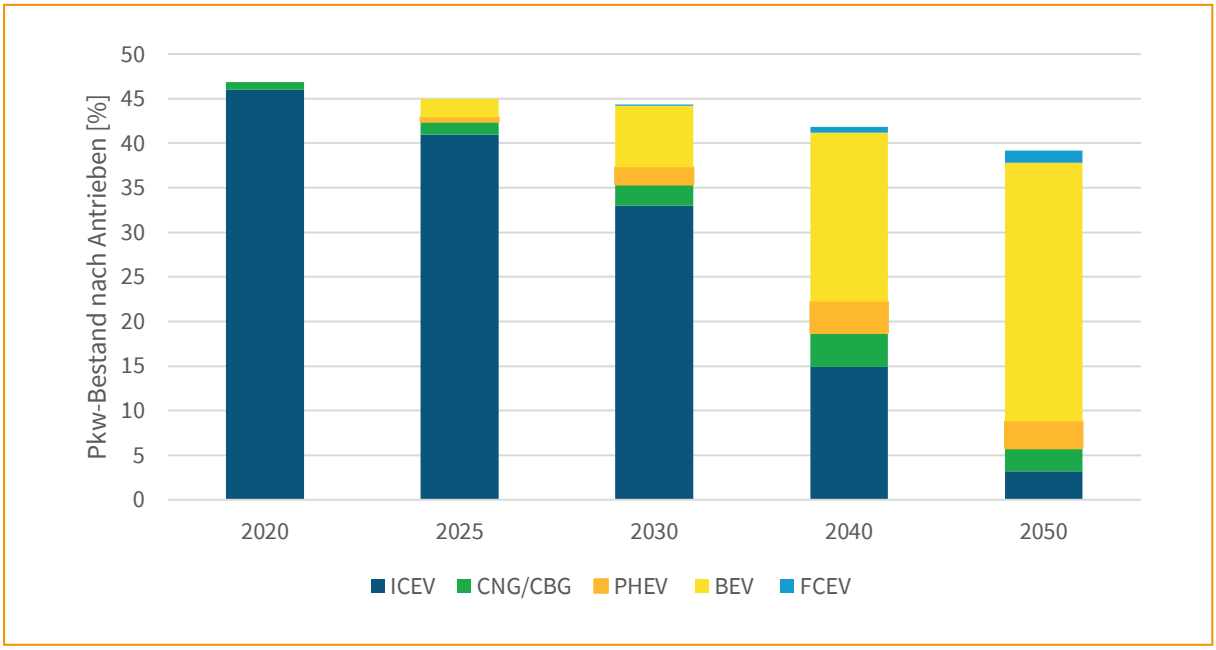


Abbildung 3 - Pkw-Bestand nach Antrieben. Quelle: Prognos AG et al. (2021)

Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass die Grundannahmen und Rahmenbedingungen im Zielszenario 1 die Marktdurchdringung einzelner Antriebsalternativen stark mitbestimmten. Die geringe unterstellte Bedeutung von FCEVs beispielsweise hat deutliche Auswirkungen auf deren Wirtschaftlichkeit, da Kostensenkungspotenziale durch Lern- und Skaleneffekte bei diesem Antrieb aufgrund von relativ geringen Stückzahlen kaum auftreten.

Die aus dem Pkw-Bestand resultierenden Energiebedarfe sind in Tabelle 3 dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass Flüssigkraftstoffe, unabhängig vom Herstellungspfad mit der Zeit eine immer geringere Rolle spielen werden, ganz im Gegensatz zu Strom. Methan wird zwischenzeitlich etwas umfassender genutzt und Wasserstoff als Energieträger im Verkehr kommt eine wachsende, aber insgesamt sehr geringe Rolle zu.

Energiebedarf [PJ]	2020	2025	2030	2040	2050
Flüssigkraftstoffe	1.328,4	1.121,7	801,5	275,0	12,0
Strom	4,5	31,6	86,7	179,1	233,2
Methan	12,0	46,1	100,1	157,7	86,0
Wasserstoff	0,3	1,5	4,0	19,2	40,6

Tabelle 3 - Energiebedarfe im Pkw-Verkehr. Quelle: Prognos AG et al. (2021).

Beimischung erneuerbarer Energien

Um unter den benannten Energiebedarfen, die Ziele des Klimaschutzplan bis 2030 und auch darüber hinaus bis 2050 einhalten zu können, ist ein steigender Anteil an erneuerbaren Energien im Verkehr erforderlich. Daher sind entsprechende Beimischungsquoten von Energieträgern aus erneuerbaren Energiequellen erforderlich.

Biomassepotenzial

Entsprechend des Zielszenarios 1 von Prognos AG et al. (2021) wird ein Biomassepotenzial von bis zu 1.490 PJ für das Gesamtsystem angenommen. Das Biomassepotenzial von heimischen Reststoffen und Waldholz wurde vom Deutschen Biomasseforschungszentrum quantifiziert und beläuft sich auf 1.091 Petajoule (PJ) p. a. (750 PJ Holz, 141 PJ Stroh, 200 PJ sonstige Reststoffe). Die übrige Biomasse wird importiert. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass vor allem in Osteuropa noch zusätzliche Potenziale für Biomasse existieren, die im Rahmen dieser Studie allerdings nicht quantifiziert werden können. Der Einsatz in den Sektoren Gebäude und Umwandlung nimmt ab, wohingegen der Verbrauch in den Sektoren Industrie und Verkehr steigt. Im Verkehr werden hauptsächlich Biodiesel und Biomethan eingesetzt.

Biokraftstoffe erster und zweiter Generation

Bei den biogenen Energieträgern sind hinsichtlich der Ausgangsmaterialien und Technologien zwei Generationen zu unterscheiden. Biokraftstoffe erster Generation verwenden als Ausgangsstoffe ölhaltige oder stärke- und zuckerhaltige Pflanzen. Biokraftstoffe auf Palmölbasis wurden gemäß des Kabinettsbeschlusses zur „Weiterentwicklung der Treibhausgasquote“ vom 03.02.2021 ausgeschlossen. Biokraftstoffe zweiter Generation werden aus organischen Abfällen und Reststoffen (z.B. Stroh, Abfallholz und Holzreste) hergestellt. Entsprechend der Ausgangsmaterialien verändern sich auch die Treibhausgasemissionen der Energieträger (siehe Kapitel 2.5.2). Die angenommen Mischungsquote von Biokraftstoffen erster und zweiter Generation ist Prognos AG et al. (2021) entnommen (siehe Abbildung 4).

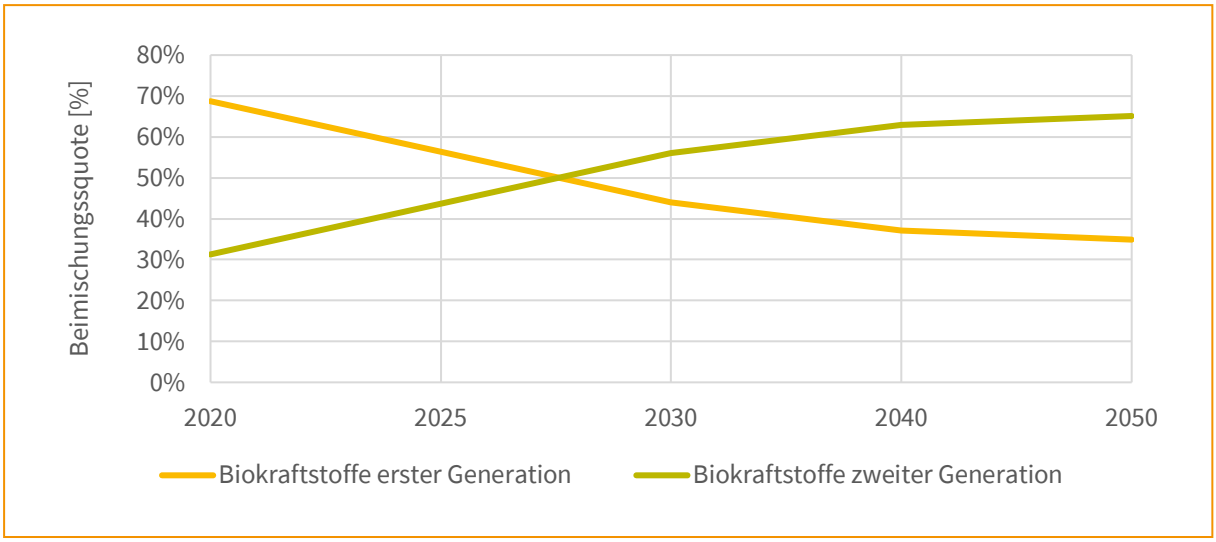


Abbildung 4 - Mischungsquote von Biokraftstoffen erster und zweiter Generation. Quelle: Prognos AG et al. (2021)

Potenzial synthetischer Energieträger

In Anlehnung an Zielszenario 1 von Prognos AG et al. (2021) wird angenommen, dass synthetischer Wasserstoff (Power-to-Hydrogen - PtH_2) ausschließlich inländisch, auf Basis von Strom entsprechend des deutschen Strommix, hergestellt wird. In 2050 werden im Verkehr etwa 81 PJ in Deutschland eingesetzt. Synthetisches Methan (Power-to-Gas - PtG) sowie synthetische Flüssigkraftstoffe werden ausschließlich importiert. 2050 werden insgesamt 417 PJ PtG sowie 554 PJ PtL in Deutschland sektorübergreifend eingesetzt (Prognos AG et al. 2021).

Beimischungsquoten bei Flüssigkraftstoffen

Bei den Flüssigkraftstoffen (im Rahmen dieser Studie Benzin- und Dieselkraftstoff) wird gemäß Prognos AG et al. (2021) angenommen, dass der biogene Anteil von 5% in 2020 auf 10% in 2030 steigt und bis 2050 mehr als zwei Drittel aus macht (siehe Abbildung 5). Synthetische Flüssigkraftstoffe finden erst sehr spät Berücksichtigung im Energieträgermix. Im Jahr 2030 werden rund 4% synthetische Flüssigkrafstoffe (PtL) und bis 2050 etwa 30% beigemischt. Beim PtL-Wert für 2050 wird von Prognos AG et al. (2021) abgewichen, weil dort 2050 noch von einem geringen fossilen Anteil ausgegangen wird. Dieser wurde zugunsten von PtL substituiert (1 PJ im Jahr 2050).

Es ist zu betonen, dass zwar der Anteil erneuerbarer Energien bei Flüssigkraftstoffen vor allem ab 2040 stark zunimmt, gleichzeitig jedoch die Energiemenge insgesamt abnimmt (siehe Tabelle 4).

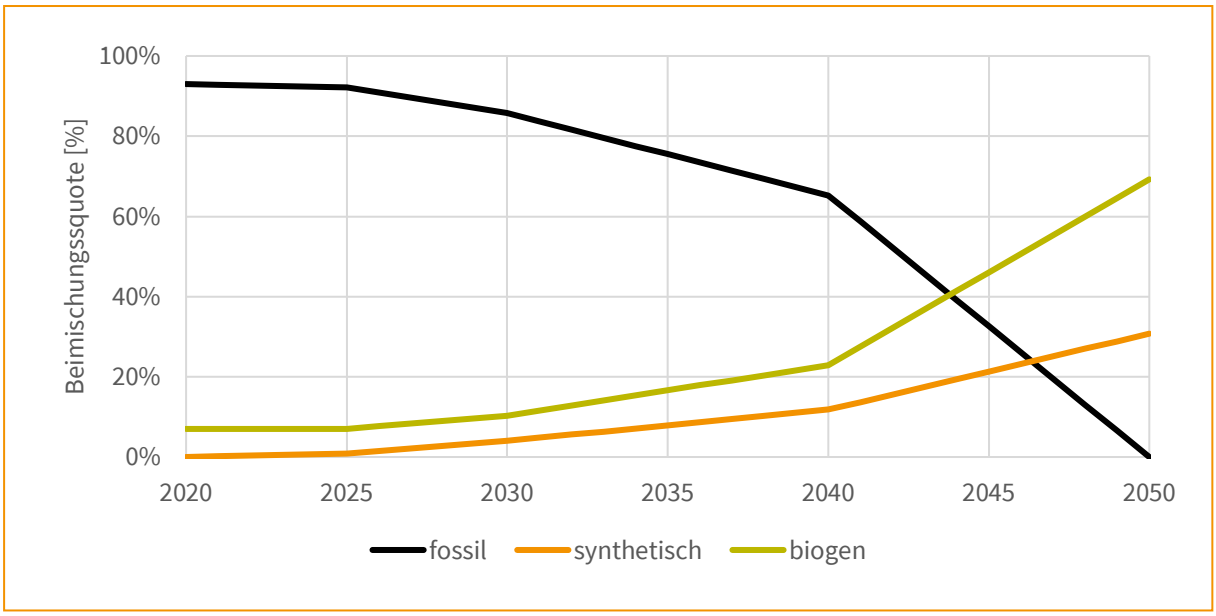


Abbildung 5 - Beimischungsquoten erneuerbarer Energien bei Flüssigkraftstoffen. Quelle: Prognos AG et al. (2021)

Jahr	2020	2025	2030	2040	2050
fossil	1.259	1.034	687	179	1
biogen	70	79	82	63	8
synthetisch	0	9	32	32	3

Tabelle 4 - Verteilung der Energiequellen von Flüssigkraftstoffen in Petajoule. Quelle: Prognos AG et al. (2021).

Beimischungsquoten bei Methan

Die Beimischungsquote erneuerbarer Energien bei Methan entstammen ebenfalls auf Prognos AG et al. (2021). Sie zeigen einen klaren Trend hin zu biogenem Methan (siehe Abbildung 6). Zur Erreichung der ambitionierten Klimaziele im Verkehr bis 2030 wird im Zielszenario 1 ein starker Anstieg des Anteils von

Biomethan angenommen, welcher anschließend wieder etwas abnimmt. Synthetisches Methan spielt im Verkehr kaum eine Rolle.

Wie bei den Flüssigkraftstoffen ist auch bei Methan auf die Entwicklung der gesamten Energiemenge zu schauen. Bis 2040 spielt Methan im Pkw-Verkehr eine immer stärkere Rolle, die dann wieder etwas abnimmt (siehe Tabelle 5).

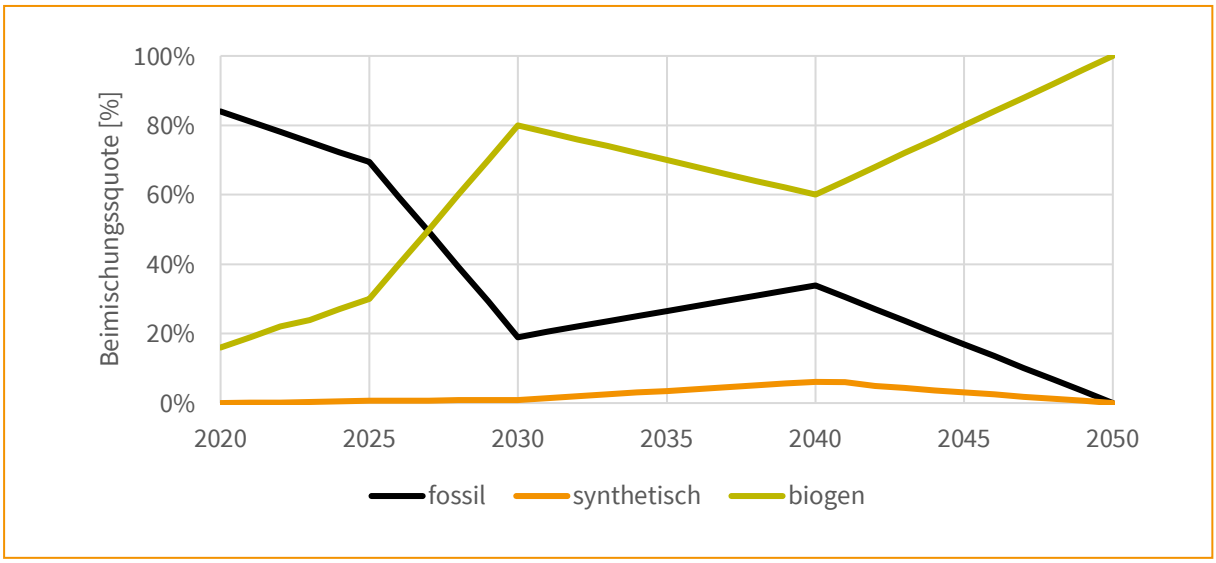


Abbildung 6 - Beimischungsquoten erneuerbarer Energien bei Methan. Quelle: in Anlehnung an Prognos AG et al. (2021)

Jahr	2020	2025	2030	2040	2050
fossil	10,1	32,0	19,1	53,4	0,0
biogen	1,9	13,8	80,1	94,6	86,0
PtL	0,0	0,3	0,9	9,7	0,0

Tabelle 5 - Verteilung der Energiequellen von Methan in Petajoule. Quelle: in Anlehnung an Prognos AG et al. (2021).

Beimischungsquoten bei Wasserstoff

Gemäß des Zielszenarios 1 von Prognos AG et al. (2021) wird synthetischer Wasserstoff ausschließlich im Verkehr eingesetzt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass PtH_2 vollständig inländisch aus dem Strommix mittels Elektrolyse erzeugt wird, was laut Prognos AG (2020a) und mehrerer anderer Studien die wirtschaftlichere Alternative gegenüber Import darstellt. Zwar würden die in Deutschland aus Elektrolyse erzeugten PtH_2-Mengen ausreichen, um den gesamten Bedarf des Pkw-Verkehrs über den Betrachtungszeitraum hinweg zu decken. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der Anteil von PtH_2 am gesamten erzeugten Wasserstoff (beispielsweise über Dampfreformierung oder als Nebenprodukt in der chemischen Industrie) von 8% in 2016 (Prognos AG et al. 2021) bis 2030 kontinuierlich auf 100% angehoben wird (siehe Abbildung 7). Dies erscheint aufgrund der geringen Gesamtmengen (siehe Tabelle 6) von Wasserstoff im Pkw-Verkehr plausibel.

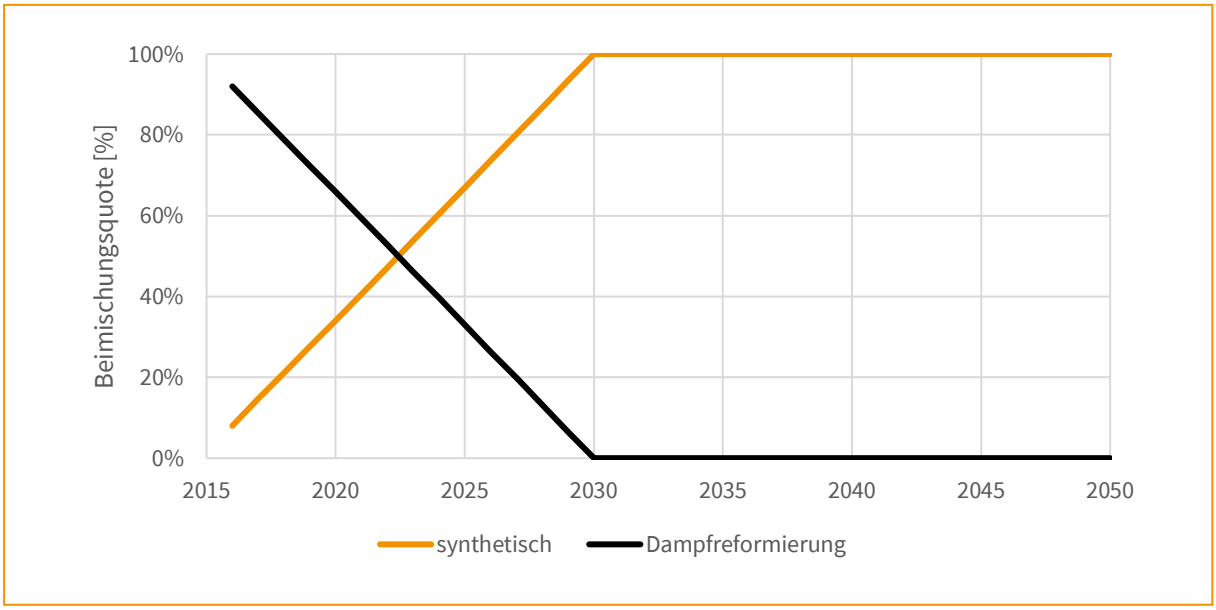


Abbildung 7 - Beimischungsquoten erneuerbarer Energien bei Wasserstoff. Quelle: Prognos AG et al. (2021)

Jahr	2020	2025	2030	2040	2050
H_2 im Pkw-Verkehr [PJ]	0,3	1,5	4,0	19,2	40,6

Tabelle 6 - Entwicklung des Wasserstoffbedarfs im Pkw-Verkehr. Quelle: Prognos AG et al. (2021).

Spezifische CO_2-Emissionen von Strom

Als weitere wichtige Rahmengröße des Energieszenarios sind die spezifischen CO_2-Emissionen von Strom gemäß des deutschen Strommixes zu nennen. Diese entsprechen dem Zielszenario 1 von Prognos AG et al. (2021) und sind in Abbildung 8 dargestellt. Diese sinken kontinuierlich bis 2050 auf eine Wert nahe Null.

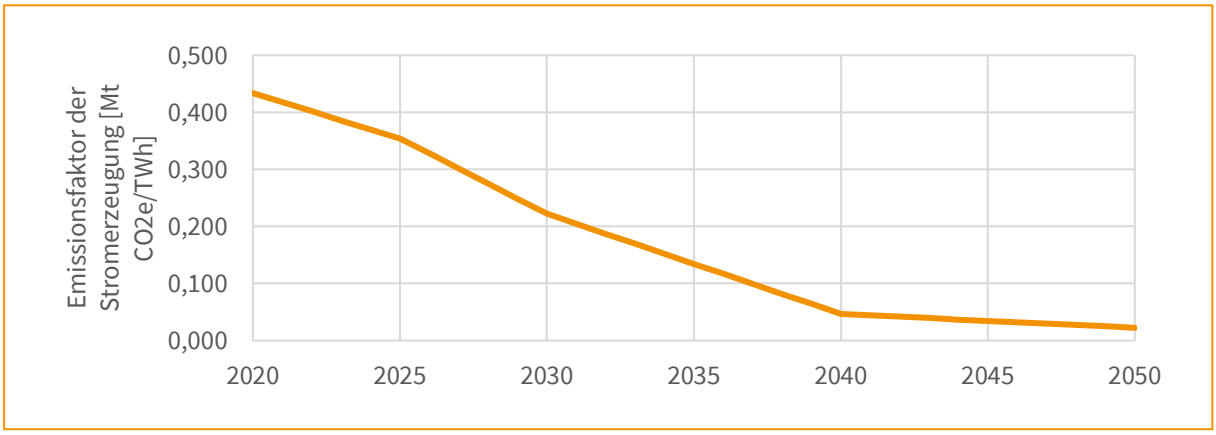


Abbildung 8 - Entwicklung spezifischen CO_2-Emissionen von Strom im deutschen Strommix. Quelle: Prognos AG et al. (2021)

CO_2-Besteuerung

Wie bereits erläutert wurde, ist eines der wesentlichen Politikinstrumente im Zielszenario 1 von Prognos AG et al. (2021) eine CO_2-Besteuerung. Gemäß der aktuellen Regulierung beträgt diese nominal 25€/t CO_2 in 2021

und steigt schrittweise auf 55€ im Jahr 2025. Für 2026 gilt ein Preiskorridor von 55€ bis 65€, im Anschluss werden die Zertifikate frei gehandelt. In Anlehnung an Prognos AG et al. (2021) und MCC und PIK (2019) werden für 2026 60€ angenommen und bis 2030 eine lineare Steigerung auf 190€ real (180€$_{2016}$). Nach 2030 wird gemäß Prognos AG et al. (2021) ein Anstieg auf 232€ real (220€$_{2016}$) angenommen. Dieser Wert wird 2037 erreicht und bleibt dann konstant. Die Entwicklung der CO_2-Steuer ist in Abbildung 9 dargestellt.

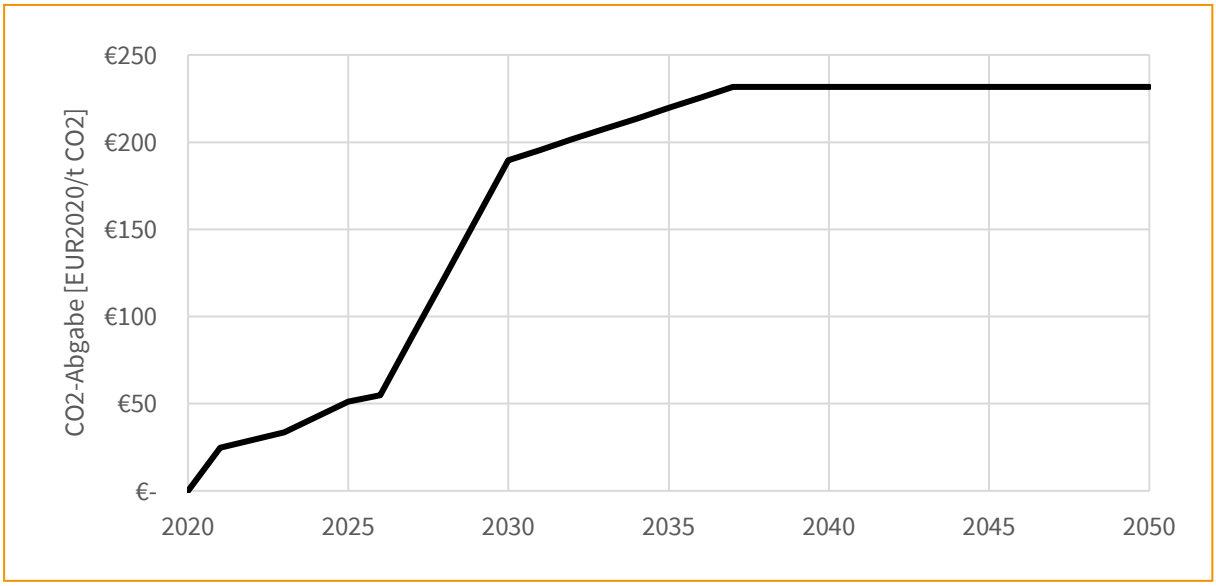


Abbildung 9 - Entwicklung der CO_2-Steuer. Quelle: in Anlehnung an Prognos AG et al. (2021)

2.3.4 Referenzfahrzeuge

Für die in Kapitel 2.3.1 definierten Fahrzeuge wurden die Fahrzeugparameter sowie die entsprechenden Energieverbräuche mit Hilfe der vorgestellten Methode berechnet. Für die Betrachtungszeitpunkte 2030 und 2050 wurden Wirkungsgradsteigerungen für die einzelnen Antriebe sowie andere technologische Weiterentwicklungen berücksichtigt, um die Fahrzeugeigenschaften und die Energieverbräuche für diese Zeitpunkte modellieren zu können. In Tabelle 7 sind die Fahrzeugeigenschaften sowie die Fahrenergieverbräuche für die verschiedenen Fahrzeugsegmente, Antriebe und Betrachtungszeitpunkte dargestellt.

		Verbrauch pro 100 km			Nennleistung [kW]			Fahrzeugmasse [kg[		
		2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Benzin	Kleinwagen	7,0 l	-	-	79	-	-	1191	-	-
	Kompaktklasse	7,1 l	-	-	99	-	-	1345	-	-
	SUVs	8,3 l	-	-	109	-	-	1502	-	-
Benzin MHEV	Kleinwagen	6,8 l	5,6 l	6,9 l	85			1222		
	Kompaktklasse	6,9 l	5,6 l	7,0 l	105			1376		

			Verbrauch pro 100 km			Nennleistung [kW]			Fahrzeugmasse [kg[		
			2020	2030	2050	2020	2030	2050	2020	2030	2050
	SUVs		8,1 l	6,7 l	8,2 l	115			1533		
Benzin FHEV	Kleinwagen		5,4 l	4,4 l	5,4 l	79 + 67			1275		
	Kompaktklasse		5,5 l	4,5 l	5,5 l	99 + 67			1429		
	SUVs		6,8 l	5,5 l	6,8 l	109 + 67			1586		
Diesel	Kleinwagen		5,0 l	-	-	75			1165	-	-
	Kompaktklasse		5,9 l	-	-	99			1455		-
	SUVs		7,2 l	-	-	120			1652	-	-
Diesel MHEV	Kleinwagen		4,8 l	4,6 l	4,9 l	81			1196		
	Kompaktklasse		5,7 l	5,5 l	5,8 l	105			1486		
	SUVs		7,0 l	6,8 l	7,1 l	126			1683		
CNG/CBG	Kleinwagen		4,3 kg	3,7 kg	3,3 kg	66			1269		
	Kompaktklasse		4,8 kg	4,1 kg	3,7 kg	96			1419		
	SUVs		5,6 kg	4,8 kg	4,3 kg	105			1650		
PHEV	Kleinwagen	VKM	2,6 l	1,5 l	1,8 l	64			1341	1296	1264
		EM	10,7 kWh	12,8 kWh		64					
	Kompaktklasse	VKM	3,4 l	1,8 l	2,3 l	106			1646	1612	1575
		EM	10,9 kWh	13,1 kWh		72					
	SUVs	VKM	5,5 l	3,0 l	3,7 l	147			1985	1877	1830
		EM	12,7 kWh	15,2 kWh		92					
BEV	Kleinwagen		20,0 kWh	14,9 kWh	14,9 kWh	102			1519	1381	1254
	Kompaktklasse		19,0 kWh	16,9 kWh	16,9 kWh	127			1724	1587	1436
	SUVs		21,6 kWh	19,3 kWh	19,3 kWh	182			2007	1893	1687
FCEV	Kleinwagen		-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kompaktklasse		1,0 kg	0,8 kg		114			1850		
	SUVs		1,2 kg	1,0 kg		120			1889		

Tabelle 7 - Referenzfahrzeuge und Antriebe

Die ermittelten Fahrzeugparameter entsprechen den Erwartungen. Die Fahrzeugmasse, die Antriebsleistung sowie der Kraftstoffverbrauch steigen tendenziell mit dem Fahrzeugsegment an. Dies lässt sich auf die Größe der Fahrzeuge zurückführen. Lediglich bei den batterieelektrischen Fahrzeugen zeigen die Fahrzeuge aus dem Kleinwagensegment höhere Fahrenergiebedarfe als es bei den Fahrzeugen aus der

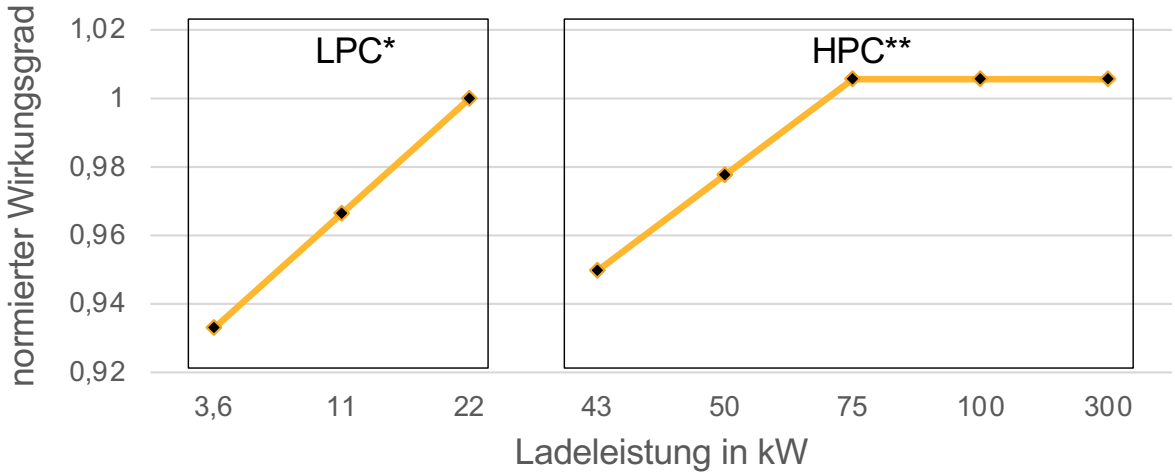
Kompaktwagenklasse mit diesem Antrieb der Fall ist. Dies lässt sich auf das durchschnittliche Produktalter zurückführen. In der Kompaktwagenklasse konnten zum Zeitpunkt der Datenerhebung sehr aktuelle Fahrzeuge, das heißt Fahrzeuge auf dem neuesten Stand der Technik zu Bewertung herangezogen werden. In der Kleinwagenklasse hingegen stellen eher ältere Fahrzeuge, welche noch nicht den neuesten Stand der Technik verbaut hatten, den Großteil der neuzugelassenen Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb. Es ist zudem zu erkennen, dass die Fahrzeuge mit konventionellem Dieselantrieb aufgrund des höheren Energiegehalts des Kraftstoffs geringere Verbräuche und aufgrund der zusätzlichen Komponenten (Adblue, Partikelfilter, Abgasreinigung etc.) etwas höhere Massen aufweisen als ihre ottomotorischen Pendants.

Die in Tabelle 7 gezeigten Kraftstoffverbräuche wurden mit Hilfe der durch die Zertifizierung im Worlwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle (WLTC) auf dem Prüfstand ermittelten Verbräuche sowie einem Aufschlag für den Realverbrauch auf der Straße berechnet. Für die konventionellen Diesel- und Benzinantriebe wurde dieser Aufschlag mit Hilfe des Datenpools vom ADAC-Ecotest nach (ADAC 2021), Daten aus dem Spritmonitor (Fisch und Fischl GmbH 2021) und der Studie des ICCT (ICCT 2019) ermittelt und beträgt im Mittel etwa 25%. Für die leicht elektrifizierten Mild-Hybrid-Antriebe wurde derselbe Aufschlag genutzt.

Für FHEV-Antriebe standen zum Zeitpunkt der Datenerhebung die Kraftstoffverbräuche, welche nach dem abgelösten Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ermittelt wurden, zur Verfügung. Die Ermittlung des WLTC-äquivalenten Verbrauchs erfolgt dann über die Berechnung des Verhältnisses von NEFZ- und WLTC-Verbräuchen von Benzin- und Diesel-Antrieben und der Anwendung dieses Verhältnisses auf die im NEFZ ermitteln FHEV-Verbräuche. Anschließend erfolgt eine Berechnung der realitätsnahen Verbräuche mit der zuvor vorgestellten Methode der Realverbrauchsrechnung.

Die Ermittlung der Realverbrauchsfaktors der Full-Hybrid-Antriebe, der Brennstoffzellen- sowie der batterieelektrischen Fahrzeuge wurde mit Hilfe des Datenpools des ADAC-Ecotests nach (ADAC 2021) durchgeführt. Energieverluste, die während des Ladens auftreten, sind in dem Fahrenergieverbrauch, der durch die Zertifizierung ermittelt wird, bereits enthalten (vgl. (Zacher 2019)) und werden standardmäßig mit einem 22 kW-Ladegerät ermittelt. Um mögliche Einflüsse durch alternative Ladetechnologien zu berücksichtigen, wurde ein vereinfachter Ansatz zur Berechnung des relativen Wirkungsgrades bei unterschiedlichen Ladetechnologien gewählt. Es sei darauf hingewiesen, dass Energieverluste beim Laden von einer Vielzahl von Randbedingungen wie etwa der Batterietemperatur, dem Batterieladezustand, der Leistung, mit der geladen werden
soll, dem Fahrzeugsystem usw. abhängig sind (vgl. (Apostolaki-Iosifidou et al. 2017; Genovese et al. 2015)) und eine detaillierte Abbildung dieser Zusammenhänge in dieser Studie nicht umgesetzt wurde. Abbildung 10 zeigt den relativen Ladewirkungsgrad bezogen auf das Standardladen mit 22 kW.

Für Plug-In-Hybride wird durch die Zertifizierung ein kombinierter Kraftstoff- und Stromverbrauch ermittelt. Dabei wird in der Regel ein deutlich zu optimistischer Wert für den Kraftstoffverbrauch und gleichzeitig ein etwas zu hoher Stromverbrauch ermittelt (vgl. (Plötz et al. 2020a)). Um auch für diesen Antrieb eine hohe Realitätsnähe gewährleisten zu können, ist zum einen der sogenannte Utility Faktor zu berücksichtigen, welcher eine Aussage darüber trifft, wie groß die realen Anteile verbrennungsmotorischen und elektrischen Fahrens sind (Plötz et al. 2020a).



*Low Power Charging
**High Powere Charging

Abbildung 10 - Relativer Ladewirkungsgrad bei verschiedenen Ladeleistungen

Tabelle 8 zeigt die Realverbrauchsfaktoren für die verschiedenen Fahrzeugklassen und Antriebsformen für das Jahr 2020. Für die Betrachtungszeitpunkte 2030 und 2050 wird keine Änderung dieses Faktors angenommen.

	Realverbrauchsfaktor
Benzin	1,25
Benzin MHEV	1,25
Benzin FHEV	1,33
Diesel	1,25
Diesel MHEV	1,25
CNG/CBG	1,15
PHEV Kraftstoff	3,00
PHEV Strom	0,75
BEV	1,15
FCEV	1,23

Tabelle 8 - Realverbrauchsfaktor für verschiedene Antriebsformen

Für die Fahrzeuge mit rein elektrischem sowie für die Fahrzeuge mit Plug-In-Hybrid-Antrieb wurde die elektrische Reichweite mit Hilfe des realitätsnahen Verbrauchs und der nutzbaren (Netto-)Kapazität der Traktionsbatterie bestimmt. Diese beträgt im Mittel 92 % von der Nennkapazität und wurde mit Hilfe von Angaben aus der ADAC-Autodatenbank in (ADAC 2020b) ermittelt. Ausgehend von den aktuellen elektrischen Reichweiten wurde eine Annahme bezüglich der künftigen elektrischen Reichweiten vorgenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die elektrische Reichweite sowohl für BEV als auch für PHEV signifikant ansteigen werden, so wie es in Abbildung 11 dargestellt ist. Da gleichzeitig davon ausgegangen wird, dass

der Wirkungsgrad elektrischer Antriebe bis zum Jahr 2030 noch leicht ansteigen wird, steigt die notwendige Batteriekapazität nicht um dasselbe Maß wie die Reichweite. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass die gravimetrische Energiedichte von Traktionsbatterien in den nächsten Jahren zunehmen wird. Daraus ergibt sich, dass sich die Masse batterieelektrischer und von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen etwas reduziert, obwohl die elektrische Reichweite ansteigen wird.

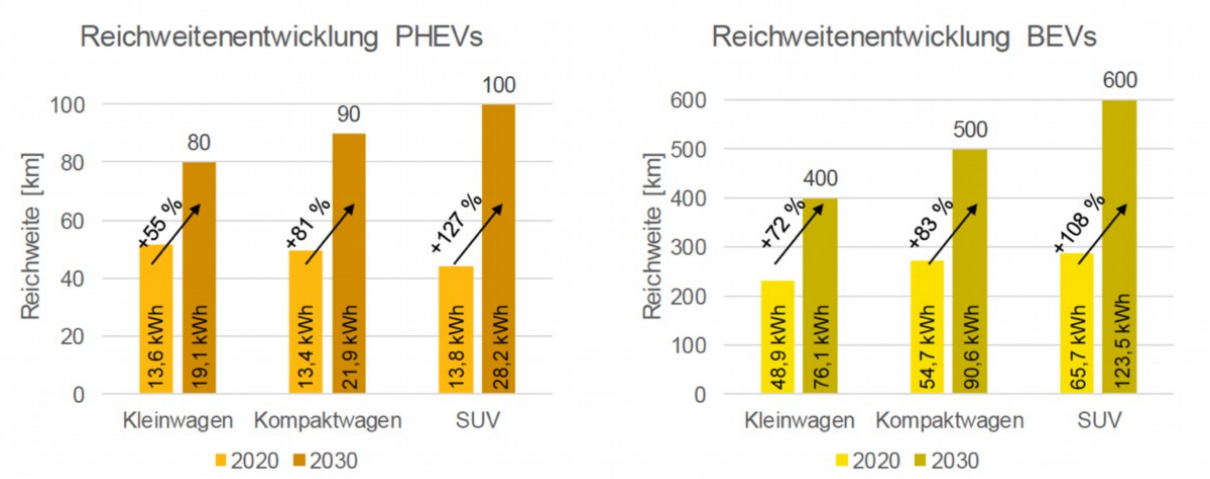


Abbildung 11 - Entwicklung der elektrischen Reichweite sowie der Batteriekapazität bis zum Jahr 2030 für verschiedene Fahrzeugsegmente

Für alle Antriebe, die in dieser Studie betrachtet werden, ist mit einem Anstieg des Gesamtsystemwirkungsgrades zu rechnen. Diesem Sachverhalt wurde Rechnungen getragen, indem auf den Fahrenergieverbrauch von 2020 ein verbrauchsmindernder Faktor aufgerechnet wurde. So wurde für Benzinmotoren ein durchschnittlicher Wirkungsgradzuwachs von gut 19 % angenommen (Sens et al.), da für diese Motoren noch deutlichen Entwicklungsspielraum für Effizienzverbesserungen gibt. Dazu zählen beispielsweise Sonderbrennverfahren wie das Miller-Verfahren, welches in Verbindung mit einer wirkungsgradsteigernden Anhebung des Verdichtungsverhältnisses zum Einsatz kommt, sowie Zylinderabschaltung in heute wirkungsgradungünstigen Teillastbereich des Motors, welche vor allem im urbanen Betrieb relevant sind. Weitere Technologiebausteine sind etwa die coronale Vorkammerzündung (vgl. (Jander et al. 2020)). Für den Dieselmotor wird ein Wirkungsgradzuwachs von knapp 4 % ermittelt. Durch die Entwicklungsarbeiten der letzten Jahrzehnte am Dieselmotor weist dieser bereits einen sehr hohen Reifegrad bzgl. seiner Effizienz auf, sodass für diese Aggregate nur noch mit marginalen Verbesserungen zu rechnen ist (vgl. (Sens et al.)). Die Wirkungsgradsteigerungen für Diesel- und Benzinantriebe finden am Betrachtungszeitpunkt 2030 ebenfalls für die Mild-Hybrid-Antriebe Anwendung. Für Gasantriebe wird neben der zu erwartenden Wirkungsgradsteigerung, welche auch für Benzinmotoren zu erwarten ist, da beiden nach einem sehr ähnlichen Prinzip arbeiten, zusätzlich mit einem weiteren Anstieg des Wirkungsgrades zu rechnen, wenn die Motoren als monovalente Gasmotoren ausgelegt sind und beispielsweise die höhere Klopffestigkeit von Gaskraftstoffen nutzen. Aus einem Vergleich eines monovalenten Gasmotors mit einem hubraumgleichen Benzinmotor desselben Herstellers wurde eine durchschnittliche Wirkungsgradsteigerung auf Grund der Technologieumstellung berechnet. Für Plug-In-Hybrid-Antriebe wird mit einer

signifikanten Anhebung der elektrischen Reichweite sowie mit einer Verschiebung des Utility Faktors hin zu höheren elektrischen Fahranteilen gerechnet (vgl. (Plötz et al. 2020a)). Es ergibt sich daher eine deutliche Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitigem Zuwachs des Stromverbrauchs. In Summe wird in 2030 beim PHEV jedoch ein geringerer Gesamtfahrenergiebedarf berechnet. Bei den batterieelektrischen Fahrzeugen wird mit einem Wirkungsgradzuwachs im Antrieb von 5 %[2] gerechnet. Darüber hinaus wird erwartet, dass die Energieverluste beim Laden ebenfalls um 5 %[1] absinken, sodass sich für batterieelektrische Fahrzeuge ein kumulierter Wirkungsgradzuwachs von knapp 10 % ergibt. Für Brennstoffzellenfahrzeuge wird mit einer Anhebung der Zellspannung gerechnet, woraus sich bei gleichbleibender Leistung geringere Stromstärken und damit verbunden reduzierte Verlustleistungen ergeben. Es wird mit einem Wirkungsgradzuwachs von gut 15 % gerechnet (vgl. (Hebling et al. 2019)). Tabelle 9 fasst die zu erwartenden Wirkungsgradänderungen von den Betrachtungszeitpunkten 2020 auf 2030 zusammen. Für die Zeit nach 2030 wird für keinen der Antriebe noch eine wesentliche Wirkungsgradveränderung angenommen (vgl. (Sens et al.)).

	Wirkungsgradänderung
Benzin	+ 19,2 %
Diesel	+ 3,9 %
CNG/CBG	+ 22,4 %
PHEV	+ 45,5 % (Kraftstoff) - 19,6 % (Strom
BEV	+ 9,8 %
FCEV	+ 15,4 %

Tabelle 9 - Wirkungsgradveränderungen verschiedener Antrieb von 2020 bis 2030

Einfluss alternativer Kraftstoffe

Für die Zukunft wird ein Anstieg des Anteils synthetischer und biogener Kraftstoffe erwartet. Diese weisen auf Grund ihrer Zusammensetzung teilweise zu fossilen Kraftstoffen unterschiedliche Heizwerte auf, welche sich auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. So weisen biogene Kraftstoffe in der Regel geringere Heizwerte auf, als es bei fossilen Kraftstoffen der Fall ist. Synthetische Kraftstoffe hingegen können gleiche oder sogar gesteigerte Heizwerte aufweisen (vgl. (Zeddies und Schönleber 2017)). Je nach Zumischquote wirkt sich das auf

[2] Experteneinschätzung durch BIT GmbH

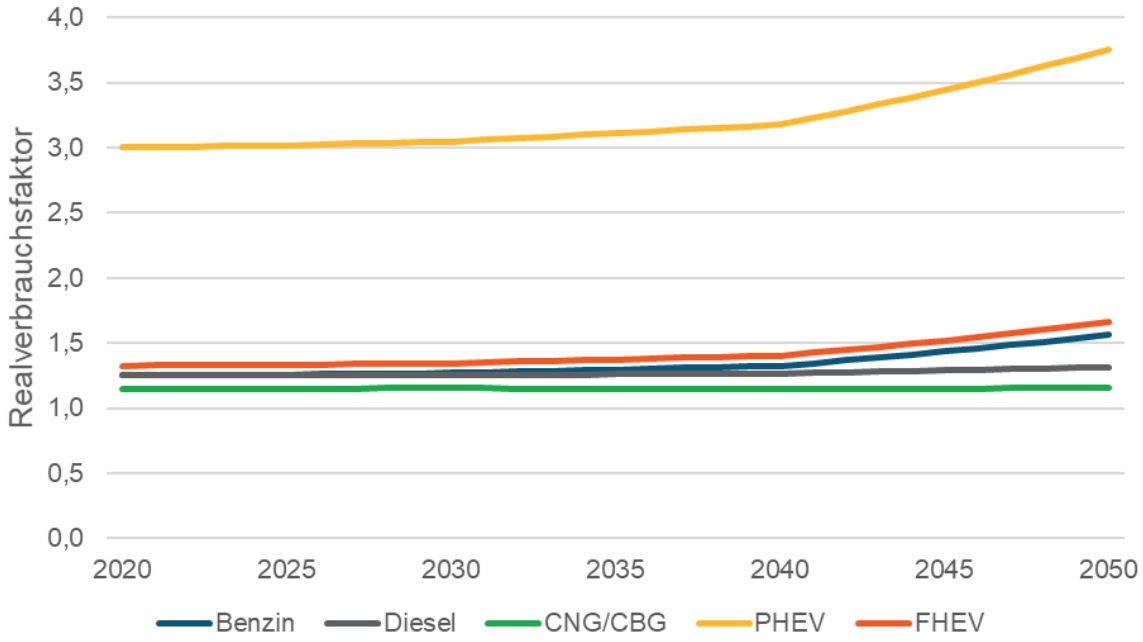


Abbildung 12 - Realverbrauchsfaktor

den Gemischheizwert des Kraftstoffs aus und wird entsprechend bei der Berechnung des realitätsnahen Verbrauchs berücksichtigt. Der Verlauf des Realverbrauchfaktors für die betrachteten Antriebe ist in Abbildung 12 dargestellt.

2.4 Ökonomische Parameter

2.4.1 Allgemeine ökonomische Parameter

Diskontierungszinssatz

Zur Diskontierung aller Kosten auf den Zeitpunkt der Fahrzeuganschaffung wird in Anlehnung an Fraunhofer ISI und DVGW (2018) und Wietschel et al. (2019) ein inflationsbereinigter Zinssatz von vier Prozent angenommen. Dieser berücksichtigt die zeitlichen Präferenzen der Endkunden sowie die Refinanzierungskosten der Investitionen.

Inflationsrate

Alle angegebenen Kosten und Preise wurden mittels historischer und prognostizierter Inflationsraten auf das Jahr 2020 umgerechnet, sodass im Rahmen der ökonomischen Analyse ein Vergleich auf Basis realer Preise erfolgen kann. Die historischen Inflationsraten wurden Destatis (2021) entnommen, Prognosen der Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2020).

Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	...	2050
Inflationsrate	0,50%	0,50%	1,50%	1,80%	1,40%	0,50%	1,40%	1,60%	1,50%	...	1,50%

Tabelle 10 - Inflationsrate in Deutschland von 2015 bis 2050 (Veränderung des Verbraucherpreisindex gegenüber Vorjahr). Quelle: Destatis (2021); Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2020).

2.4.2 Anschaffungskosten Fahrzeug und Restwertbestimmung

Anschaffungskosten Pkw 2020

Die Bestimmung der Anschaffungskosten bzw. Kaufpreise für das Jahr 2020 basiert im Wesentlichen auf der Verwendung von Marktpreisen. Für konsistente und nachvollziehbare Werte sowie ein plausibles Verhältnis der Anschaffungskosten unter den Segmenten und Antriebsvarianten erfolgt eine Gegenüberstellung mit anderen Studien. Insofern das Ergebnis der Marktpreisbestimmung zu keinem konsistenten Bild führte, wurden die Preise daher entsprechend mit Literaturwerten korrigiert. Methodisch zu unterscheiden sind dabei Benzin- und Dieselfahrzeuge, Gasfahrzeuge, die Mild- und Voll-Hybridvarianten, Plug-In Hybridfahrzeuge, batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge.

Für Benzin- und Dieselfahrzeuge erfolgt die Preisbestimmung anhand der Fahrzeugpreise des ADAC Autokostenrechners 2020, gemittelt über die Ausstattung (ADAC 2020a) Nach Segment und Antrieb werden dabei die Preise für die fünf häufigsten Neuzulassungen betrachtet und anhand der KBA Neuzulassungen aus dem Jahr 2019 gewichtet (KBA 2019). Bei der Gewichtung über die Neuzulassung konnte keine Trennung zwischen Benzin und Diesel vorgenommen werden.

Für Erdgasfahrzeuge wird ein modellspezifischer Aufpreis von 1.728 Euro gegenüber der jeweils vergleichbaren Benzinvariante nach Wietschel et al. (2019). Dieses Vorgehen erfolgt hierbei gleichermaßen für alle Segmente. Gemäß Wietschel et al. (2019) wurden mit Hilfe des ADAC Autokostenrechners modellspezifische Aufpreise aller verfügbaren CNG-Pkw gegenüber ihren Benzin-Pendants ermittelt. Abschließend wurde dieser Aufpreis als ungewichteter Mittelwert über alle Segmente bestimmt.

Für MHEV und FHEV wurden zunächst ebenfalls modellspezifische Aufpreise je Segment anhand des ADAC Autokostenrechners bestimmt. Für MHEV lagen die identifizierten Aufpreise zwischen 200 und 3.250 Euro. Für FHEV lagen diese zwischen 1.600 und 6.600 Euro. Zulassungsgewichtet über alle Segmente lag der durchschnittliche FHEV Aufpreis bei 3.450 Euro. Bei der Bestimmung ergab sich jedoch die Problematik, dass Modelle nicht eindeutig einer Hybridkategorie zugeordnet werden konnten. Daher ergibt sich für MHEVs eine unklare Trennschärfe gegenüber reinen Start-Stopp Systemen mit geringeren Aufpreisen und teureren Vollhybrid-Konfigurationen. Aus diesem Grund wurden zusätzlich literaturbasierte Herstellkosten in Abhängigkeit von Segment, Motorisierung und elektrischer Antriebsleistung herangezogen.

Für MHEV liegen diese nach Tschiesner et al. (2020) zwischen 700 und 1.100 Euro, nach FEV (2017) bei 740 Euro, nach H-D Systems (2018) bei 600 bis 1.300 Euro und nach Ricardo (2015) bei 829 bis 1.595 Euro. In Anlehnung an Tschiesner et al. (2020) werden modellspezifische Aufpreise von 910 Euro für Kleinwagen, 1.060 Euro für Kompaktwagen und 1.215 Euro für SUVs angesetzt. Für FHEV liegen die Herstellkosten nach Tschiesner et al. (2020) zwischen 1.500 und 2.500 Euro, nach FEV (2014) bei 1.700 bis 2.800 Euro, nach H-D Systems (2018) bei 2.200 bis 5.400 Euro und nach Ricardo (2015) bei 2.500 bis 3.200 Euro. Für Kleinwagen wird ein Aufpreis von 3.389 Euro als literaturbasierter Mittelwert verwendet. Für SUVs wird ein zulassungsgewichteter Mittelwert anhand modellspezifischer Aufpreise für Ford Kuga, Honda CR-V und Lexus UX von 6.282 Euro gemäß ADAC Autokostenrechner verwendet (ADAC 2020a). Für die Kompaktklasse wird der Mittelwert aus Kleinwagen und SUV verwendet.

Für PHEV der Kompaktklasse und des SUV-Segments werden die Marktpreise gemäß ADAC Autokostenrechner (ADAC 2020a) und der Liste der förderfähigen Elektrofahrzeuge (KBA 2020a) bestimmt. Analog werden die fünf am häufigsten neu zugelassenen Modelle herangezogen. Die Gewichtung erfolgt anhand der Neuzulassungen YTD September 2020 (KBA 2020b). Dabei wurde über alle Ausstattungen gemittelt. Für Kleinwagen gibt es aktuell keine PHEV-Modelle. Daher wurde ein fiktiver Kaufpreis für dieses Segment anhand des Aufpreises zwischen Kleinwagen und SUV beim Benziner skaliert.

Für BEV werden Kaufpreise analog zu PHEV anhand der Marktpreise bestimmt. Die verwendeten Quellen und der Bezugszeitraum der Neuzulassung für die Bestimmung der Top5 Modelle und Gewichtung sind analog zu PHEV. Insofern mehrere Modellvarianten mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten verfügbar waren, wurden die Zulassungszahlen gleichmäßig auf alle Varianten verteilt. Insgesamt konnte so eine auf die Bestimmung der Fahrzeugkonfigurationen methodisch konsistente und harmonische Bestimmung des Fahrzeugpreises gewährleistet werden.

Aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit für Brennstoffzellenfahrzeuge werden nur die auf dem Markt verfügbaren Fahrzeuge betrachtet. Für die Kompaktklasse erfolgt die Bestimmung des Kaufpreises anhand des Toyota Mirai Gen II. Dieser ist der Mittelklasse zuzuordnen und wird mit einem Kaufpreis von rund 63.900 Euro angegeben (ADAC 2020d). Daher wird eine für Toyota spezifische Differenz zwischen Kompakt- und Mittelklasse anhand der konventionellen Diesel-Modelle Auris und Avensis bestimmt und abgezogen. Dieser liegt bei 4.850 Euro (ADAC 2020a). Insgesamt ergibt sich somit ein Kaufpreis von 59.050 Euro. Für das SUV-Segment wird der Mittelwert der Preise des Hyundai ix35 mit 64.500 Euro und des Hyundai Nexo mit 77.000 Euro angenommen (ADAC 2020a). Weitere Modelle wie der Mercedes GLC F-Cell können nicht käuflich erworben werden, sondern sind lediglich im Rahmen eines Full-Service-Mietmodells verfügbar. Nach H2 Mobility (2021) ist der Honda Clarity in Deutschland nicht lieferbar. Daher werden die beiden zuletzt genannten Fahrzeuge nicht betrachtet.

Abbildung 13 zeigt die Kaufpreise aller Fahrzeuge und Segmente zum Zeitpunkt 2020. Der Mehrpreis für BEV gegenüber der konventionellen Benzinvariante liegt zwischen 42 und 72%. Die Benzinvariante stellt in allen Segmenten die Einstiegsklasse dar. Das Ergebnis zeigt, dass die Kaufpreisdifferenz zwischen den Antrieben mit der Größe des Fahrzeugsegments wächst. Lediglich die FCEV zeigen einen deutlichen Aufpreis gegenüber den anderen Modellen.

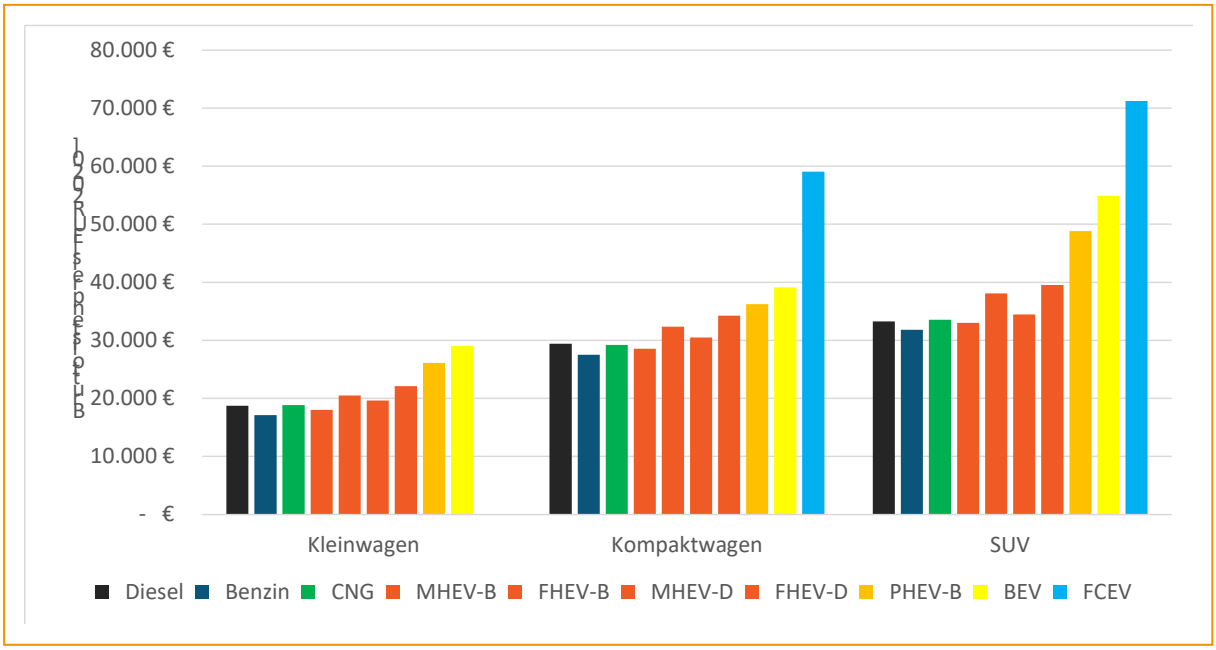


Abbildung 13 - Anschaffungskosten der Antriebsalternativen 2020 in den verschiedenen Segmenten (Bruttolistenpreise bzw. Kaufpreise). Quelle: Eigene Berechnung

Kaufpreissubventionen Pkw und Dienstwagenregelung

Um Anreize für den Kauf von rein batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-in Hybriden zu setzen, fördert die Bundesregierung deren Kauf durch einen Umweltbonus und eine zusätzliche Innovationsprämie. Der Ende 2019 beschlossene Umweltbonus gilt rückwirkend für alle ab dem 5. November 2019 zugelassenen Fahrzeuge und besteht bis zum 31. Dezember 2025. Die Innovationsprämie wurde 2020 mit Bezug auf die Corona-Pandemie beschlossen und sieht eine Verdopplung des staatlichen Anteils der Förderung vor. Die Innovationsprämie gilt bis zum 31. Dezember 2021. Der ausgezahlte Betrag ist hierbei steuerfrei und hängt vom Grad der Elektrifizierung sowie vom Nettolistenpreis ab. Für vollelektrische Fahrzeuge liegt die Förderung bei 7.500 oder 9.000 Euro. Für Plug-In Hybride bei 5.625 oder 6.750 Euro (BMWi 2020). Für das Basisszenario in den Haltergruppen Privat und für Flottenfahrzeuge wird für den Anschaffungszeitpunkt 2020 die volle Kaupreissubvention aus Umweltbonus und der zusätzlichen Innovationsprämie angenommen. In den Jahren 2030 und 2040 werden keine Subventionen unterstellt.

Für Dienstwagenfahrer gibt es ähnliche Vergünstigungen. Seit 1. Januar 2020 werden reine Elektrofahrzeuge mit nur 0,25 Prozent statt wie bisher mit 0,5 Prozent des Bruttolistenpreises verrechnet, insofern dieser unter 60.000 Euro liegt. Darüber fallen wie bisher auch 0,5% an. Für PHEVs dagegen gilt auch weiterhin die 0,5% Regelung, insofern Fahrzeuge eine gewisse elektrische Reichweite aufweisen und eine Obergrenze für CO2-Emissionen pro Kilometer nicht überschritten wird (EStG §6). Die Regelungen gelten bis Ende 2030. Der Regelsatz für Dienstwagennutzer bleibt nach dem Einkommenssteuergesetz bei 1%. Für das Basisszenario im Anschaffungszeitraum 2020 wird die günstigere Dienstwagenregelung berücksichtigt. In den Jahren 2030 und 2040 wird keine Vergünstigung angenommen.

Anschaffungskosten Pkw 2030+

Die Prognose der zukünftigen Anschaffungskosten basiert auf einer komponentenbasierten Analyse der spezifischen Kosten (bspw. €/kW oder €/kWh) für wesentliche Komponenten des jeweiligen Antriebsstrangs

im zeitlichen Verlauf zwischen 2010 und 2050. Zu diesem Zweck wurde eine Meta-Analyse diverser Literaturquellen wie Studien und Tear-Down Reports erstellt. Der überwiegende Teil der Studien ist dabei öffentlich zugänglich, andere wurden käuflich erworben und sind daher nicht frei erhältlich. Alle Daten wurden in einer Datenbank gesammelt, bereinigt und auf die gleiche Preisbasis (EUR2020) sowie Bezugsgröße umgerechnet. Wurde die Preisbasis in der Studie explizit angegeben, wurde diese herangezogen. Andernfalls wurden unter der Annahme, dass Studienjahr und Preisbasis übereinstimmen, die angegebenen nominalen Anschaffungskosten durch Berücksichtigung der Inflation umgerechnet. Bei der Auswahl der Studien wurde darauf geachtet, dass es sich vorwiegend um europäische oder internationale Studien handelt, um eine möglichst umfassende und neutrale Sichtweise zu erhalten. Der Fokus lag auf Komponenten für xEV-Anwendung, vornehmlich für den Pkw-Bereich. Bei der Aktualität der Quellen wurde generell Literatur nach 2016 verwendet, sofern ausreichend Quellen zur Verfügung standen. Die gesammelten Daten wurden statistisch ausgewertet indem entsprechende Konfidenzintervalle, 25% Quartil, 75% Quartil sowie der Median im zeitlichen Verlauf bestimmt wurden. Hierdurch konnten Trends identifiziert und robuste Szenarien für mögliche Kostenentwicklungen bestimmt werden. Die im Rahmen dieser Studie verwendeten Kostenwerte orientieren sich am zeitlichen Verlauf der Mediane sowie einer mittels Regression bestimmten Lernkurve über die Mediane zur Glättung. Die so bestimmten Werte wurden abschließend gerundet. Die Prognose der zukünftigen Anschaffungskosten wurde durchgeführt, indem zunächst der Anteil der einzelnen Komponentenkosten für das Jahr 2020 bestimmt wurde. Daran anschließend wurde mit Hilfe der ermittelten Kostenpfade der zukünftige Anteil bestimmt und die entsprechende Minderung der Anschaffungskosten abgeleitet. Hierdurch werden indirekte Kostenbestandteile - unter anderem Vertrieb, Marketing, Controlling, Forschung und Entwicklung - sowie Margen, die im heutigen Kaufpreis enthalten sind, implizit übernommen.

Im Folgenden werden auszugsweise Kostenverläufe für Batterien und Brennstoffzellen vorgestellt, da diese Komponenten den größten Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Abgebildet sind jeweils die Boxplot-Auswertungen aller berücksichtigten Studien bzw. Datenpunkte im zeitlichen Verlauf zwischen 2010 und 2050. Weiterhin ist die oben beschriebene Lernkurve (blaue Kurve) gezeigt. Alle verwendeten Quellen sowie weitere Kostenverläufe sind im Anhang aufgeführt.

Abbildung 14 zeigt die zeitliche Entwicklung der spezifischen Batteriesystemkosten sowie das Ergebnis der Meta-Analyse in Boxplot-Darstellung. Diese umfassen die einzelnen Batteriezellen, die Integration zu Batteriemodulen und Packs sowie das BMS. Hierfür wurde zusätzlich auf Inhalte im Rahmen der Begleitmaßnahme zur Förderinitiative Batterie 2020 (BEMA 2020) und der darin eingebetteten Batterie-Roadmaps nach Thielmann et al. (2017) am Fraunhofer ISI zurückgegriffen. Durch die hohe Dynamik in der Batteriezellforschung wurden lediglich Quellen aus den Jahren 2018 bis 2020 verwendet. Auf Basis aktueller Ankündigungen diverser OEMs wird davon ausgegangen, dass sich mittelfristig im Automotive-Sektor Lithium-Ionen basierte Technologien und vor allem großformatige prismatische sowie Pouch-Zellen durchsetzen (Takeshita 2019a). Ein Umrechnungsfaktor der Cell-to-Pack-Kosten wurde auf Basis von (BNEF 2019), (eucar 2019), (Fries et al. 2017) und (Yole 2020) abgeleitet. Für Batteriezellen für hybride Anwendungen wird der analoge Verlauf der Kosten angenommen, allerdings sind die Kosten hier um den Faktor 2,5 für HEV sowie 1,5 für PHEV skaliert. Grund hierfür liegt in den Anforderungen. Für BEVs werden Hochenergiezellen benötigt, für hybridisierte Anwendungen dagegen Hochleistungszellen (Zapf et al. 2020). Beide unterscheiden sich primär im Elektroden- und Zelldesign. Es wird angenommen, dass der heute zu beobachtende Preisunterschied auch in den kommenden Jahren bleiben wird. In Summe ergeben sich für

2020 Batteriekosten von 150 €/kWh sowie von 80 €/kWh für 2030. Langfristig wird bis 2050 mit Kosten von 50 €/kWh gerechnet.

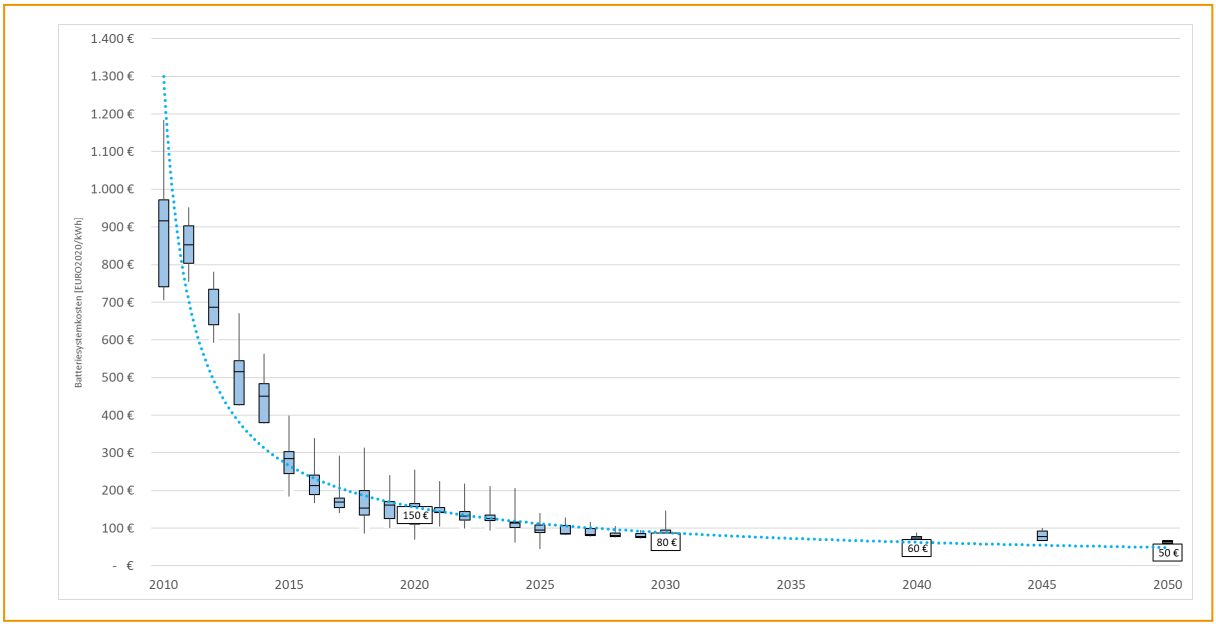


Abbildung 14 - Batteriesystemkosten im zeitlichen Verlauf. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 15 zeigt die zeitliche Entwicklung der spezifischen Brennstoffzellenkosten. Diese umfassen die einzelnen Stacks, die Integration zu Modulen sowie das Brennstoffzellen-Managementsystem. Für Brennstoffzelle und Wasserstofftank wurden Analogien aus dem Bereich der schweren Nutzfahrzeuge herangezogen, da nur wenige Quellen für Pkw-Anwendungen verfügbar waren. Der überwiegende Teil der Studien ist aus dem amerikanischen Raum. Methodisch werden hier oft Kostenprognosen mit Lernkurven und Stückzahlabschätzungen prognostiziert, ohne direkte Kopplung an Jahreszahlen. Hier gibt das US Department of Energy (DOE) langfristige Herstellkosten von $ 30 pro kW für eine kumulierte Stückzahl von über 1.000.000 Systemen an (James 2018). Hierdurch ergibt sich eine höhere Unsicherheit und Streuung der Werte im Vergleich zu den Batteriekosten, was in Abbildung 15 anhand der entsprechenden großen Spannbreite der Boxplots verdeutlicht wird. Durch die Vorgabe des Energieszenarios (siehe Kapitel 2.3.3), haben FCEV im Pkw-Bereich aber auch bei schweren Nutzfahrzeugen nur eine untergeordnete Rolle. Global gehen die Autoren dieser Studie dennoch davon aus, dass Brennstoffzellensysteme in anderen Ländern eine wichtige Rolle spielen und global die hohen Kostendegressionseffekte erzielt werden können. Als Ergebnis der Meta-Analyse ergeben sich für 2020 Brennstoffzellenkosten von 160 €/kWh sowie von 80 €/kWh für 2030. Langfristig wird mit einem Preis von 45€/kWh gerechnet.

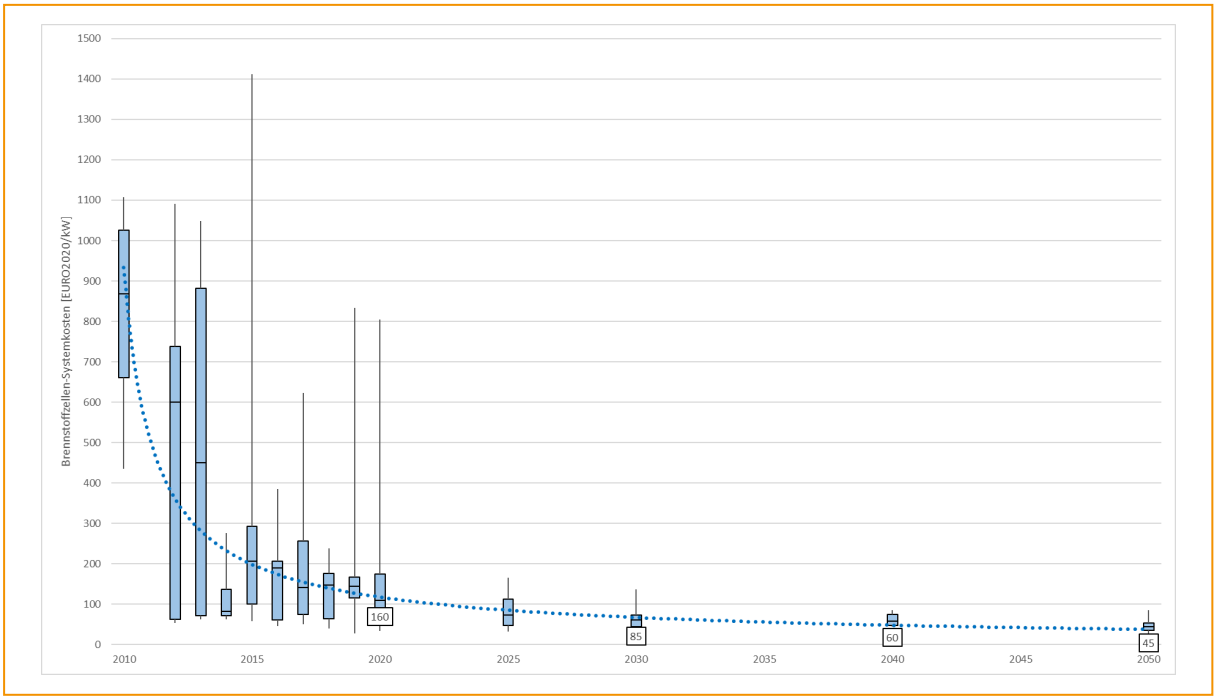


Abbildung 15 - Brennstoffzellen-Systemkosten im zeitlichen Verlauf. Quelle: Eigene Berechnung

Für ICEV wurden spezifische Kosten gemäß Ricardo (2015) modelliert. Hier wurden neben den Kosten für Motor und Getriebe, die spezifischen Kosten für die Effizienzsteigerung sowie für Abgasnachbehandlung berücksichtigt. Alternativ werden in ähnlichen Studien - wie Hülsmann et al. (2014) oder Bubeck et al. (2016) - pauschale Kostensteigerungen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren angesetzt, die mit höheren Effizienz durch innermotorische Optimierung und steigende Anforderungen an die Abgasnachbehandlung begründet werden. Um die studienspezifischen Annahmen bzgl. der technischen Weiterentwicklung besser zu erfassen, wurden die drei Bestandteile separat modelliert. Für Motor und Getriebe werden nach Ricardo (2015) grundsätzlich mäßig sinkende Kosten durch eine höhere kumulierte Stückzahl und Lernkurveneffekte angenommen. Die Effizienzsteigerung für Benziner, Diesel und Gasfahrzeug werden gemäß der angesetzten Verbrauchsverbesserung bepreist. Hier werden ebenfalls die in Ricardo (2015) angegebenen Kosten je Prozent Verbrauchseinsparung und je Antriebstechnologie herangezogen. Entsprechend ist eine höhere Effizienzsteigerung mit einem höheren Anstieg des Kaufpreises verbunden. Für die Abgasnachbehandlung werden konstante Kosten gemäß Ricardo (2015) angesetzt. Damit werden potentielle Kostensteigerungen durch eine Verschärfung der EURO 7 Abgasnorm im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt. Für den Benziner wird ein zusätzlicher Otto-Partikelfilter verbaut. Ein eindeutiger Aufpreis konnte nicht bestimmt werden. Je nach Quelle liegen die reinen Herstellkosten zwischen 25 Euro (T&E 2016) und, je nach Hubraum, 70 bis 120 Euro (Minjares und Sanchez 2011). In Mamakos (2011) wird ein Anstieg des Fahrzeugkaufpreises zwischen etwa 50 und 220 Euro angegeben. Im Rahmen dieser Studie wird ein mittlerer Preisanstieg von 150 Euro angesetzt.

Bei hybridisierten Antrieben werden die elektrischen und konventionellen Komponenten getrennt voneinander bepreist. Der zukünftige Kaufpreis ergibt sich aus der Überlagerung beider Preisentwicklungen. Die Verbrennungsmotoren, inklusive Effizienzsteigerung und Abgasnachbehandlung werden gemäß der oben aufgeführten Logik bepreist. Es ergeben sich entsprechend steigende Kosten je nach Grad der Effizienzverbesserung. Bei den elektrischen Komponenten dagegen ist eine Kostensenkung zu erwarten.

Für den PHEV werden, mit Ausnahme der Batteriekosten, die gleichen Kostenverläufe der elektrischen Komponenten wie für einen BEV angenommen. Bei den MHEV und FHEV wird dagegen anhand der Kostenentwicklung der elektrischen Komponenten der zukünftige Aufpreis des Hybridpakets bestimmt, um konsistent gegenüber der Preisbestimmung für das Jahr 2020 zu bleiben. Hierfür wurden zunächst die Kostenanteile der Einzelkomponenten für das Jahr 2020 bestimmt. Anschließend wurde anhand der Kostenpfade die resultierende Gesamtkostensenkung bestimmt. Exemplarisch liegt die so abgeleitete Preisreduktion für das FHEV-Hybridpaket bei 76% für 2030 und bei insgesamt 67% bis 2040 gegenüber dem Bezugsjahr 2020, unter Annahme gleicher Komponentendimensionierung.

Die Anschaffungskosten für das Jahr 2030 sind in Abbildung 16 visualisiert. Die Kaufpreise für das Jahr 2040 befinden sich im Anhang. Der Kaufpreis für benzinbetriebene Fahrzeuge steigt dabei stärker als der von Dieselfahrzeugen, da eine höhere Effizienzsteigerung angenommen wird. Für Benziner steigen die Kaufpreise künftig um etwa 2 bis 4 %, je nach Segment. In (Wietschel et al. 2019) werden 7 bis 8% angesetzt, in Öko-Institut e.V. (2019) werden 3% aufgeführt. Für Dieselfahrzeuge liegen die Steigerungen in (Wietschel et al. 2019; Hacker et al. 2015; Öko-Institut e.V. 2019) jeweils geringer, was sich mit dieser Studie deckt. Für Diesel liegt die für die vorliegende Studie ermittelte künftige Preissteigerung bei maximal 1%. Für CNG Fahrzeuge liegt die Preissteigerung bei 1,3 bis 2,8 %, je nach Segment. In Öko-Institut e.V. (2019) werden etwa 2% angesetzt. Die höhere Preissteigerung gegenüber dem Diesel begründet sich mit der stärkeren Weiterentwicklung des monovalenten Betriebs und der damit verbundenen Effizienzsteigerung in Anlehnung an den Benziner. Bei den hybridisierten Fahrzeugen ist der angesprochene gegenläufige Effekt zu beobachten. Einerseits wird der konventionelle Antriebsstrang teurer, andererseits können die elektrischen Komponenten zukünftig billiger hergestellt werden können. In der Mischung ergeben sich entsprechend leichte Kostensenkungen bzw. oder -Steigerungen, je nach Kombination und Dimensionierung der Komponenten. Bei den PHEV wird, gemäß der angenommenen Effizienzsteigerung im Projekt, davon ausgegangen, dass der Verbrennungsmotor analog zu den konventionellen Fahrzeugen weiterentwickelt wird. Ansätze, die Motorenentwicklung für PHEV zu reduzieren und durch die steigende Elektrifizierung Verbrauch und Schadstoffausstoß auf Systemebene zu reduzieren, werden nicht betrachtet. Bei BEVs liegt die Preisreduktion zwischen 2,3 und 6,8 %. In Öko-Institut e.V. (2019) werden dagegen Kostenminderungen von 15 bis 22% angenommen, je nach Szenario. In Stahl Automotive Consulting GmbH & Co. KG (2020) werden gemäß Expertenbefragung 30% Preisreduktion festgesetzt. In beiden Studien wird keine Anpassung der Batteriekapazität vorgenommen. In Wietschel et al. (2019) werden im Zeitraum von 2018 bis 2030 Preissenkungen zwischen 18 und 26% für Mittel- und Oberklassewagen bei leicht steigenden Batteriekapazitäten angenommen. Gründe für die geringe Kostendegression in dieser Studie liegen einerseits in den enorm steigenden Batteriekapazitäten. Ohne die Anpassung der Kapazität läge die Reduktion bei 14% und damit noch immer im unteren Bereich. Andererseits herrscht eine große Unsicherheit hinsichtlich heutiger und zukünftiger Komponentenkosten, wie die Spannbreiten in der Meta-Analyse der einzelnen Komponenten zeigen. Weiterhin ist die Einbeziehung von Margen und indirekten Kosten, die in der Regel Segment- und herstellerspezifisch sind, ein Unsicherheitsfaktor. In vielen anderen Studien werden hierfür bewusst nur Basis- oder Herstellkosten (vgl. Öko-Institut e.V. (2019)) angegeben, was jedoch der Endkundenorientierung dieser Studie entgegenstehen würde. Für Brennstoffzellenfahrzeuge liegt die Kostensenkung in dieser Studie bei bis zu 19 %.

Im Gesamtbild zeigt sich, dass für hybridisierte und rein elektrische Fahrzeuge eher geringe Kostensenkungspotentiale angesetzt werden. Andererseits sind die berechneten Kostensteigerungen für konventionelle Verbrenner gegenüber anderen Studien und Literaturwerten in einer ähnlichen

Größenordnung, jedoch meist im unteren Bereich. Unterschiede in der Kostensteigerung je nach verwendetem Kraftstoff decken sich. Ökonomische Folgen einer verschärften EURO 7-Abgasnorm sind wie bereits erwähnt nicht berücksichtigt. Unter Berücksichtigung einer verschärften EURO-7-Abgasnorm ist daher eine schnellere Angleichung der Anschaffungspreise zu erwarten.

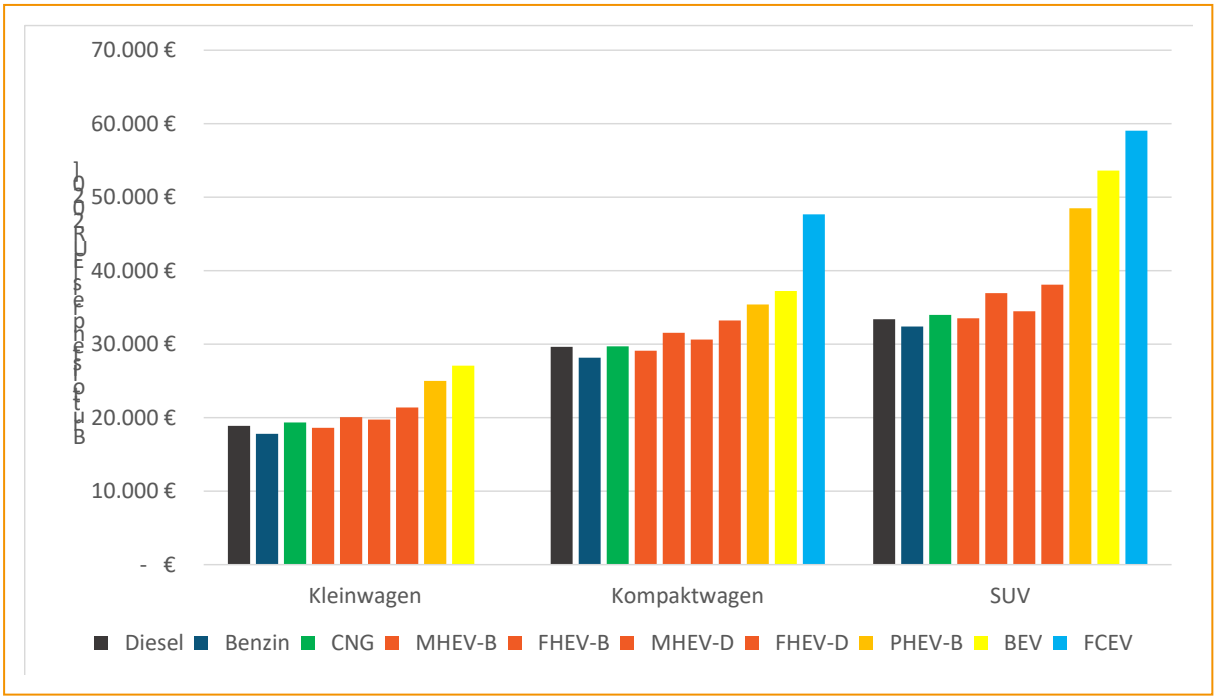


Abbildung 16 - Anschaffungskosten 2030. Quelle: Eigene Berechnung

Restwertbestimmung Pkw

Insbesondere zu Beginn der Haltedauer stellt der Wertverlust des Fahrzeugs, für die Anwendungsfälle privater Kauf und Flottennutzung, einen erheblichen Kostenanteil dar. Für die Bestimmung der Gesamtnutzungskosten ist die Restwertentwicklung daher von entscheidender Bedeutung. Für verbrennungsmotorische gibt es bereits eine umfassende historische Datenbasis für Fahrzeugmodelle, Segmente und auch einzelne Marken. Ceteris paribus können somit aus den historischen Daten auch zukünftige Restwertentwicklungen abgeleitet werden. Für Elektrofahrzeuge ist der Datenumfang des Gebrauchtwagenmarkts dagegen deutlich geringer und zum aktuellen Zeitpunkt durch zahlreiche Faktoren mit hoher Unsicherheit behaftet. Nach Hacker et al. (2015) können drei Methoden unterschieden werden: (1) Regressionskurven auf Datenbasis für konventionelle Fahrzeuge; (2) Verbrauchskostenvorteil des Zweitnutzers; (3) Restwert analog zu Diesel- bzw. Benzinfahrzeug. Weitere Ansätze, wie bspw. nach Li und Chen (2019), nehmen eine gesonderte Modellierung der Energiespeicher über eine State-of-Health Abschätzung und die potentiellen Zusatzkosten für den Zweitnutzer durch den Austausch an. Von einem Batterieaustausch während der Nutzungsphase und damit einhergehenden ökologischen und ökonomischen Auswirkungen wird insgesamt abgesehen. Für diese Arbeit wurde die Methode der Regressionskurven spezifisch je Antrieb und Segment verwendet. Diese führt, angesichts der höheren Anschaffungspreise, trotz des gleichen relativen Wertverlusts zu einer höheren absoluten Wertminderung für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (Hacker et al. 2015).

Im Grundsatz wird für die Berechnung eine Regressionskurve des statistischen Bundesamtes verwendet (Dexheimer 2003). Die unten aufgeführte Formel ist gemäß Plötz et al. (2014b) angepasst und unabhängig von einzelnen Marken. Die entscheidenden Eingangsdaten sind das Alter, die Fahrleistung sowie der Neupreis des Fahrzeugs zum Zeitpunkt des Wiederverkaufs. Der Restwert für das Jahr t wird dabei in Abhängigkeit von den in Tabelle 11 aufgeführten Parametern berechnet.

$$Restwert_t = e^{\alpha} * e^{12*\beta_1*h} * e^{\frac{\beta_2}{12}*JFL} * \frac{BLP_t}{(1+MwSt)}^{\beta_3} * (1+MwSt)$$

Name / Parameter	Variable	Wert
Alter	β_1	-0,01437
Monatsfahrleistung	β_2	-0,000117
ln(Neupreis)	β_3	0,91569
Konstante	α	0,97948
Bruttolistenpreis Zeitpunkt t	BLP_t	-
Halter des Fahrzeugs	h	$h \in \{Privat, Flotte\}$
Jahresfahrleistung	JFL	-
Restwert im Jahr t	$Restwert_t$	-

Tabelle 11 - Parameter für die Restwertberechnung

Für den privaten Nutzer wird der Restwert entsprechend nach 7 Jahren Haltedauer und gemäß der segment-spezifischen durchschnittlichen Jahresfahrleistung über den betrachteten Zeitraum bestimmt. Für Flottenfahrzeuge erfolgt die Berechnung nach 5 Jahren. Durch die Berücksichtigung des Bruttolistenpreises zum Zeitpunkt des Wiederverkaufs, also der Bruttolistenpreis in 2024 bzw. 2026, wird der Wiederverkaufswert von elektrifizierten Antrieben durch das mitunter massive Kostenreduktionspotential weiter reduziert. Die Bruttolistenpreise der Zwischenjahre wurden anhand der Stützjahre 2020 und 2030 linear abgeleitet. Der relative Restwert je Segment und Antrieb für das Jahr 2020 ist im Anhang aufgeführt.

Für die Anschaffungsjahre 2030 und 2040 wird davon ausgegangen, dass sich der relative Wertverlust der verschiedenen Antriebsalternativen im Gebrauchtwagensegment langfristig angleicht. Hierfür wird der Mittelwert je Segment über alle Antriebe und jeweils getrennt für die beiden Haltergruppen Privat und Flotte herangezogen. Die künftige Restwertentwicklung insbesondere von EVs ist mit hohen Unsicherheiten behaftet. Daher wird vereinfachend der aufgezeigte Ansatz gewählt.

Einerseits erfolgt aktuell durch die mangelnde Modellverfügbarkeit aber hohe Nachfrage nach Elektrofahrzeugen eine Verknappung des Angebots im Neu- aber auch Gebrauchtwagenmarkt, was den Wiederverkaufswert erhöht. Analysen und Auswertungen, wie bspw. Brzeski und Fechner (2019) oder Guo und Zhou (2019), zeigen überdies, dass der aktuelle Werterhalt von Plug-In Fahrzeugen besser ist als der von konventionellen Antriebssystemen. Andererseits reduziert die aktuelle Subventionierung für Neufahrzeuge die Attraktivität von gebrauchten Elektrofahrzeugen. Gleichzeitig herrscht aktuell noch immer Verunsicherung gegenüber der Batterielebensdauer und den Nutzerpräferenzen (Hacker et al. 2015). Zudem ist die aktuelle Technologie durch ein sich schnell wandelndes Produktangebot und rapide Fortschritte im Bereich der Energiespeicher schnell veraltet. Sekundärmärkte und Second-Life Anwendungen für Batterien

werden zum aktuellen Zeitpunkt von verschiedenen Einrichtungen untersucht, befinden sich jedoch in einer frühen Phase (Fischhaber et al. 2016). Andererseits können auch mögliche Verbrennerfahrverbote in Gemeinden, Städten und Regionen die Attraktivität und damit den Restwert von konventionellen Fahrzeugen stark reduzieren. Gemäß der Marktdiffusion im herangezogenen Energieszenario werden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zukünftig eine Nebenrolle spielen, was den Wiederverkauf ebenfalls beeinflusst. Investitionen in die Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren, um unter anderem zukünftige EU Abgasvorschriften einzuhalten, bleiben in Anbetracht von Ankündigungen erster Hersteller wie Audi (electrive.net 2021) ebenfalls abzuwarten und könnte das Angebot an Verbrennern weiter beeinflussen.

2.4.3 Anschaffungskosten Ladeinfrastruktur PHEV und BEV

Die Methodik zur Berechnung der Infrastrukturkosten beinhaltet zunächst die Kosten für eine Wallbox bzw. einen Charger sowie die Kosten der Installation. Es werden zwei verschiedene Arten von Wallboxen betrachtet. Für die Nutzergruppe Privat wird eine Wallbox mit 11kW angenommen (NPM 2020a) und für den gewerblichen Anwendungsfall ein Charger mit 22kW (Scherrer et al. 2019).

Für die Ermittlung der einzelnen Kostenpositionen für das Jahr 2020 wurden verschiedene Studien und Marktpreise im Zeitraum von 2017 bis 2020 verwendet. Eine Auflistung aller Werte und Quellen ist im Anhang aufgeführt. In Summe werden Wallbox-Kosten von 800 Euro als Mittelwert aller aufgeführten Quellen für diese Studie verwendet. Ein repräsentatives Modell wäre somit in etwa der VW ID Charger Pro, der mit 849 Euro angegeben ist (electrive.com 2019). Für die Installation des Chargers mit separatem Zähler werden Installationskosten von 1.200 Euro angenommen. Insgesamt ergeben sich somit Kosten von 2.000 Euro. Eine ähnliche Größenordnung wird in (Bünger et al. 2019; Bamberg et al. 2020; Stahl Automotive Consulting GmbH & Co. KG 2020) angegeben. Für die gewerbliche Nutzung werden analog 3.000 Euro für einen Charger, als Mittelwert der betrachteten Modelle und Literaturwerte, sowie 2.250 Euro für die Installation (VW 2018) angesetzt. Für die Jahre 2030 und 2040 wird keine Änderung dieser Kosten angenommen. In Bünger et al. (2019) sinken die Installationskosten 2.200 Euro in 2015 auf 1.650 Euro in 2025 durch höhere Stückzahlen und damit niedrigeren Wallbox-Stückkosten. Gemäß Bamberg et al. (2020) werden leicht steigende Kosten von 2.000 auf 2.200 Euro angenommen. Dies wird mit einer höheren Ladeleistung sowie steigender Komplexität bei der Installation der Charger in ein Heimnetz inklusive Heimspeicher und PV-Anlage begründet. Da gemäß NPM (2020a) in dieser Studie von einer konstanten Ladeleistungen im Betrachtungshorizont ausgegangen wird, stellt ein konstanter Kostenverlauf unter dieser Unsicherheit einen konsistenten Kostenpfad dar. Tabelle 12 zeigt die Einzelkosten sowie die Gesamtkosten für diese Studie:

	Charger	Installation	Gesamt
11kW Heimlader	800 €	1.200 €	2.000 €
22kW Flotte	3.000 €	2.250 €	5.250 €

Tabelle 12 - Anschaffungskosten Ladeinfrastruktur

Für die Berücksichtigung der Kosten in der TCO der Fahrzeuge wird mit einer Lebensdauer von 15 Jahren und einer linearen Abschreibung der Kosten über die Lebensdauer gerechnet. Da lediglich eine kurze Haltedauer von 5 bzw. 7 Jahren in der gewerblichen und privaten Nutzung berücksichtigt ist, wird durch diese Methodik eine Restwertberechnung und Anrechnung auf andere Fahrzeuge vermieden.

Für private Wallboxen mit Lastflexibilität wird zudem im Jahr 2020 die Förderung in Höhe von 900 Euro des Bundes bereitgestellt (BMVI 2020). Für die Jahre 2030 und 2040 wird angenommen, dass keine Förderung ausbezahlt wird.

2.4.4 Fixe Kostenparameter

Als fixe, von der Jahresfahrleistung unabhängige, Kostenparameter sind Versicherungskosten und Kfz-Steuer zu unterscheiden.

Versicherungskosten

Die Versicherungskosten werden mittel Hilfe eines Kfz-Versicherungsvergleichs auf dem Verbrauchervergleichsportal Check24 ermittelt (Check24 2020). Die Datenabfrage fand im Dezember 2020 statt. Die Abfrage umfasst die jährlichen Kosten einer Kfz-Haftpflichtversicherung und einer Vollkaskoversicherung für Neuwagen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die Realitätsnähe und die Kundenorientierung dieser Studie zu betonen. Andere Studien verweisen an dieser Stelle oft auf pauschale oder literaturbasierte Werte und/oder nehmen keine Unterscheidung des Antriebsstrangs vor (Kasten und Maier 2018; Stahl Automotive Consulting GmbH & Co. KG 2020; Hacker et al. 2015; Wietschel et al. 2019).

Gemäß GDV (2021) sind die Versicherungskosten dabei von einer Vielzahl an halter- bzw. fahrerspezifischen Faktoren, regionalen Faktoren, nutzungs- sowie fahrzeugspezifischen Faktoren abhängig. Unter anderem können hier die Typklasse, Regionalklasse, Schadensfreiheitsklasse, Nutzerkreis sowie Jahresfahrleistung aufgeführt werden. Aus diesem Grund wurden synthetische Kundenprofile für Privatpersonen, Dienst- und Flottenfahrzeugnutzer angelegt, um jeweils durchschnittliche Pkw-Nutzer in Deutschland abbilden zu können. Zu diesem Zweck wurden entsprechende Versicherungsmerkmale wie unter anderem Regionalklassen in Deutschland ausgewertet und so gewählt, dass diese dem deutschen Durchschnitt entsprechen (GDV 2020). Die Auflistung aller Merkmale und Ausprägungen ist im Anhang aufgeführt.

Die jährlichen Versicherungskosten werden dabei für die fünf häufigsten Neuzulassungen je Segment und Antrieb für die unterschiedlichen Nutzergruppen bestimmt. Die Typklassen werden entsprechend dieser Top5 Modelle gewählt. Unter der Annahme, dass die Versicherungskosten mit den Fahrzeugpreisen zusammenhängen, werden die relativen Versicherungskosten im Verhältnis zu den Fahrzeugpreisen berechnet und dabei entsprechend der Anzahl der jeweiligen Neuzulassungen gewichtet. Mithilfe des Fahrzeugpreises können somit auch die durchschnittlichen jährlichen Versicherungskosten für alle Segmente, Antriebe und Nutzergruppen berechnet werden. Die Abfrage auf Check24 umfasst dabei lediglich Benziner, Diesel, Gasfahrzeuge, Plug-In Hybride sowie batterieelektrische Modelle. Für MHEVs wird aufgrund des geringen Hybridisierungsgrades von identischen relativen Versicherungskosten ausgegangen. Für FHEVs mit höherer Hybridisierung wird der Mittelwert aus konventionellem Fahrzeug und Plug-In Hybrid verwendet. Der Versicherungspreis für Brennstoffzellenfahrzeuge wird als identisch mit dem relativen Versicherungspreis der batterieelektrischen Fahrzeuge angenommen, da es sich bei beiden um voll-elektrifizierte Fahrzeuge handelt. Durch den höheren Kaufpreis liegt die absolut zu zahlende Versicherungsprämie beim FCEV jedoch höher als beim BEV. Abbildung 17 zeigt das relative Ergebnis nach Nutzergruppe, Segment und Antrieb.

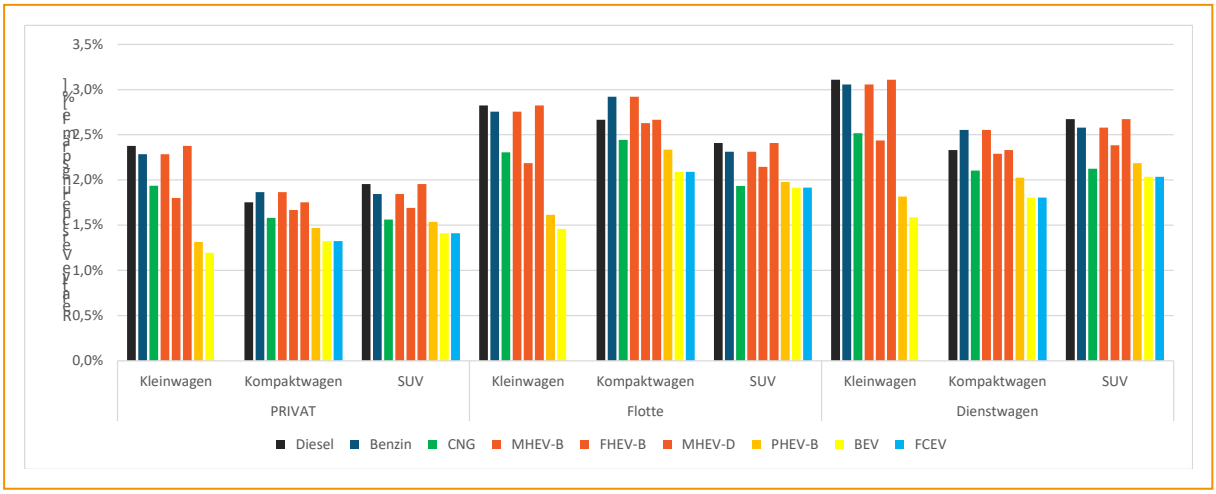


Abbildung 17 - Übersicht relative Versicherungsprämie je Antrieb und je Nutzergruppe. Quelle: Eigene Berechnung

Die zu zahlende Prämie in Euro für einen privaten Nutzer im Anschaffungsjahr 2020 ist in Abbildung 18 abgebildet. Es zeigt sich jedoch über alle Nutzergruppen und Segmente hinweg, dass die relative Versicherungsprämie für alternative Antriebe im Jahr 2020 deutlich geringer ist als für vergleichbare Benziner und Diesel. Auch zeigen sich leicht höhere Prämien beim Diesel gegenüber dem Benziner. Der CNG Antrieb weist geringfügig geringere Versicherungsprämien auf als andere konventionelle Antriebe. Plug-In Hybride lassen sich zwischen rein-elektrischen und konventionellen Antrieben einordnen. Analog zur Betrachtung der Restwerte herrscht auch bei Versicherungsprämien eine hohe Unsicherheit. Weitere Ergebnisse sind im Anhang aufgeführt.

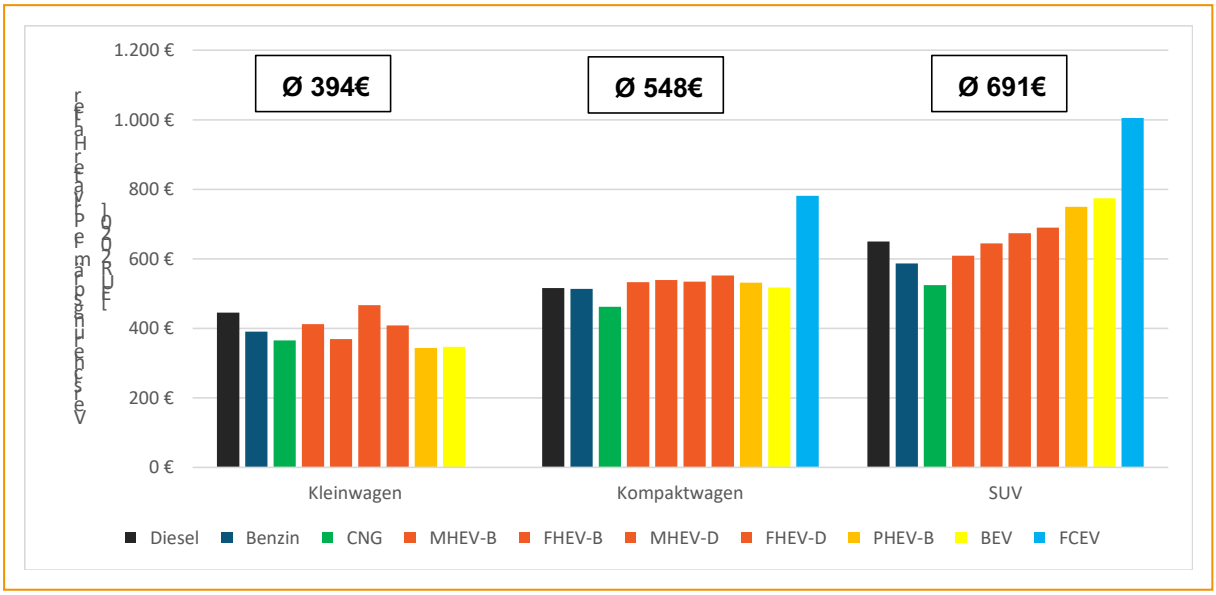


Abbildung 18 - Versicherungsprämien privater Halter. Quelle: Eigene Berechnung

In der zukünftigen Betrachtung wird von einem absoluten Angleichen der Versicherungsprämie über alle Antriebe hinweg ausgegangen. Dabei handelt es sich um eine vereinfachte Annahme, da die zu zahlende Prämie ähnlich wie die Restwertbestimmung mit hoher Unsicherheit behaftet ist. Entsprechend wird ein ungewichteter Mittelwert aller Prämien für das Jahr 2020 je Segment und Haltergruppe herangezogen (siehe

Abbildung 18). Aufgrund einer noch geringen Durchdringung von elekfritifizerten Antrieben wird bis 2025 von konstanten Prämien zum Basisjahr 2020 ausgegangen. Ab 2025 und bis 2035 erfolgt ein linearer Angleichen der Prämien auf den bestimmten Mittelwert, da hier eine breite und ausgewogene Verteilung der Antriebe im Bestand erreicht wird. Ab 2035 werden identische Prämien für alle Antriebe angenommen.

Kfz-Steuer

In Deutschland wird auf das Halten eines Fahrzeugs eine Kraftfahrzeugsteuer (kurz: Kfz-Steuer) erhoben. Hierbei handelt es sich um eine Verkehrsteuer, die der Zuständigkeit der Bundesfinanzverwaltung unterliegt (Generalzolldirektion 2020). Die Reform der Kfz-Steuer aus dem Jahr 2020 dient der stärkeren Ausrichtung der Besteuerungshöhe an der CO_2-Emission eines Fahrzeugs und somit einer Begünstigung emissionsarmer und emissionsfreier Fahrzeuge. Die Reform setzt folglich die beschlossenen Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 (BMF 2020a).

Die Berechnung der Kfz-Steuer basiert auf einem verbrauchsabhängigen und einem hubraumabhängigen Faktor, jeweils mit spezifischen Gewichtungen für Diesel- oder Benzinfahrzeuge. Die jeweiligen Gewichtungen wurden gemäß BMF (2020a) herangezogen und für jedes Segment und jeden Antrieb die daraus resultierende Kfz-Steuer basierend auf der Fahrzeugspezifikation (siehe Kapitel 2.3.1) berechnet. Zur Förderung emissionsärmerer Fahrzeuge unter 95 g CO_2/km gilt für Zulassungen ab dem 12.06.2020 zudem bis zum 31.12.2024 eine Vergünstigung von 30 Euro für maximal fünf Jahre. Für reine Elektrofahrzeuge gilt eine zehnjährige Steuerbefreiung bei einer Erstzulassung bis zum 31.12.2025 und längstens bis 2030 (BMF 2020b). Beide Förderungen wurden für die Anschaffung im Jahr 2020 berücksichtigt. Für die zukünftige Berechnung in 2030 und 2040 werden die 30 Euro Vergünstigung nicht weiter betrachtet. Gemäß eines Stated-Policy Ansatzes wird die Steuerbefreiung jedoch auch nach 2030 weiterhin berücksichtigt, da davon ausgegangen werden kann, dass die Diffusion von EVs weiterhin staatlich gefördert wird. Auf eine Korrektur des CO_2-Mix der Kraftstoffe durch Veränderung der Beimischungsquote wird verzichtet. An der Berechnung und den Gewichtungsfaktoren selbst wird keine Änderung vorgenommen. Daher bleibt der zu zahlende Kfz-Steuersatz mit Ausnahme der Vergünstigung von 30 Euro konstant. Die Ergebnisse der Kfz-Steuer je Segment und Antrieb sind im Anhang aufgeführt. Die Auswirkungen bzw. etwaige Verschiebungen zwischen den Antrieben durch diese Annahmen werden mit Hilfe des "Ohne Steuern und Umlagen" Szenarios untersucht.

2.4.5 Wartungskosten

Die Kosten für Wartung und Verschleiß werden in Euro pro Kilometer mittels der ADAC Autokosten 2020 berechnet (ADAC 2020a) sowie teilweise auf Basis einer breiten Literaturrecherche angepasst. Analog zu den Versicherungskosten erhöht dies sowohl die Realitätsnähe als auch die Kundenorientierung dieser Studie.

Für Konsistenz in der Methodik werden die Werte für die Top 5 Modelle je Segment und Antrieb ermittelt und über die Neuzulassungen gewichtet. Die Kosten umfassen dabei neben Wartung, Verschleiß und Reparatur auch Reifenkosten sowie Schmierstoffkosten (ADAC 2020a). Neben der Erhebung dieser Daten wurden verschiedene Studien herangezogen, um ein für die Studie selbst konsistentes und plausibles Bild zwischen Segmenten und verschiedenen Antriebssystemen aber auch gegenüber anderen Arbeiten zu ermöglichen. Da lediglich die Top5 Modelle betrachtet werden, und andererseits nicht alle Antriebssysteme in der Abfrage integriert werden konnten, wurden hiermit Unzulänglichkeiten bzw. Inhomogenität in der Stichprobe nivelliert. Als Referenzstudien wurden (Kasten und Maier 2018; Propfe et al. 2012; Harto 2020; Stahl Automotive Consulting GmbH & Co. KG 2020; Letmathe und Suares 2017; Plötz et al. 2014a) herangezogen. Es wird die Annahme getroffen, dass die Wartungskosten über die vergleichsweise kurze Haltedauer von drei

bis sieben Jahren konstant bleiben und kein Anstieg mit höherer Laufleistung oder Fahrzeugalter stattfindet. In den aufgeführten Referenzstudien ist dies ebenfalls der Fall. Auch werden die Wartungskosten als konstant über die unterschiedlichen Anschaffungszeitpunkte betrachtet. Die einzige Ausnahme bilden PHEVs, da hier eine Änderung des Nutzungsprofils stattfindet, wie im nachfolgenden Abschnitt erläutert wird.

Abbildung 19 zeigt die relative Größenordnung der Wartungs- und Reparaturkosten der einzelnen Antriebssysteme über alle Segmente. Der Benzinmotor ist nach (Agora Verkehrswende 2018) als Referenzfall definiert. Für den Diesel werden leicht höhere Kosten angenommen. Gründe hierfür liegen in der teureren Motorentechnik, einer aufwendigen Abgasnachbehandlung und einem höheren Kaufpreis (Islam et al. 2020). Andere Studien gehen von identischen Kosten im Vergleich zum Benziner aus (Kasten und Maier 2018; Propfe et al. 2012; Harto 2020; Wietschel et al. 2019). Das Ergebnis der ADAC Autokosten über die Top5 Modelle je Segment liegt zwischen 105% und 117%. Nach Letmathe und Suares (2017), in welcher ebenfalls ADAC Autokosten herangezogen werden, liegt der Mittelwert über alle Segmente bei 116%. In Plötz et al. (2014a) werden zwischen 102% und 105% herangzogen. In Summe werden daher segment-unabhängig 105% angenommen.

Für ein CNG-Fahrzeug werden nach Wietschel et al. (2019) Mehrkosten von 15% angesetzt. Gründe hierfür liegen in kürzeren Intervallen beim Ölwechsel, möglichen Leckagen im Gassystem, Verkokungen im Motor durch höhere Verbrennungstemperaturen bei fehlender Reinigungswirkung von Benzinadditiven, häufig zu beobachtender Korrosion am Drucktank sowie Mehrkosten bei der Hauptuntersuchung (ADAC 2020a).

MHEVs werden durch den geringen Grad der Elektrifizierung analog zu den konventionellen Antrieben angenommen. Für FHEVs werden gemäß Propfe et al. (2012) 94% der Kosten zum vergleichbaren konventionellen Antriebsstrang angesetzt, da keine eigene Datenerhebung für diesen Antrieb möglich war.

BEVs weisen, sowohl in der Literatur als auch als Ergebnis der ADAC Abfrage, geringere Wartungskosten auf. Gründe hierfür liegen in der geringeren Anzahl an Verschleißteilen im Antriebsstrang, einem Entfall des Ölwechsels, der zunehmenden Verwendung von Gleichteilen und Modulbaukästen sowie geringerem Bremsenverschleiß durch Energierückgewinnung im Betrieb (Rekuperation). In Kasten und Maier (2018) und Harto (2020) werden aus den genannten Gründen nur 50% der Kosten angesetzt. In Propfe et al. (2012) werden 81% aufgeführt. In Plötz et al. (2014a) werden 69% verwendet. Nach Letmathe und Suares (2017) liegen die Kosten bei kleineren Fahrzeugen bei 78% gegenüber dem Benziner. Als Mittelwert der drei erst genannten Arbeiten wird für diese Studie 64% herangezogen.

Für PHEVs ist die Datenlage dagegen äußerst heterogen. Einerseits erhöhen zwei vollwertige Antriebsstränge die Systemkomplexität und Fehleranfälligkeit. Dies unterstreicht das Ergebnis der ADAC Autokosten mit einem mittleren Aufpreis von 131%. Andererseits kann der konventionelle Antriebsstrang verkleinert werden und mit einem weniger wartungsintensiven elektrischen Antriebsstrang ersetzt werden. Zusätzlich reduziert auch hier die Möglichkeit einer höheren Rekuperationsleistung den Bremenverschleiß. In der Literatur werden Größenordnung zwischen 50% (Harto 2020), 89% (Plötz et al. 2014a) und 93% (Propfe et al. 2012) aufgeführt. Basierend auf einer detailierten Auswertung des Nutzungsverhaltens von PHEVs (Plötz et al. 2020b) zeigt sich, dass PHEVs zum aktuellen Zeitpunkt nur geringere elektrische Fahranteile aufweisen. Mit einer Vergrößerung der realen elektrischen Reichweite auf 80 bis 100km, wie sie in der vorliegenden Studie ab 2030 angenommen wird, sollte auch der elektrische Fahranteil steigen. Es wird daher davon ausgegangen, dass PHEVs in 2020 wie konventionelle Verbrenner genutzt werden und damit die Wartungskosten entsprechend näher an den Benziner rücken. Hier werden 89% gemäß (Plötz et al. 2014a)

herangezogen und damit ein Wert unterhalb eines FHEVs. Für 2030 und damit höheren elektrischen Fahranteilen werden relative Kosten von 72% als literaturbasierter Mittelwert angesetzt.

Für Brennstoffzellenfahrzeuge ist der Studienumfang begrenzt. Im Vergleich zum rein elektrischen Antriebsstrang beim BEV müssen der teure Brennstoffzellen-Stack, Reinigungsarbeiten im Luftsystem, der Wasserstofftank sowie insgesamt die höhere Systemkomplexität berücksichtigt werden. Hier wurde eine Analogie aus dem Bereich der schwereren Nutzfahrzeuge verwendet. Nach (Fraunhofer ISI et al. 2017b) werden 85% der Kosten in dieser Studie verwendet.

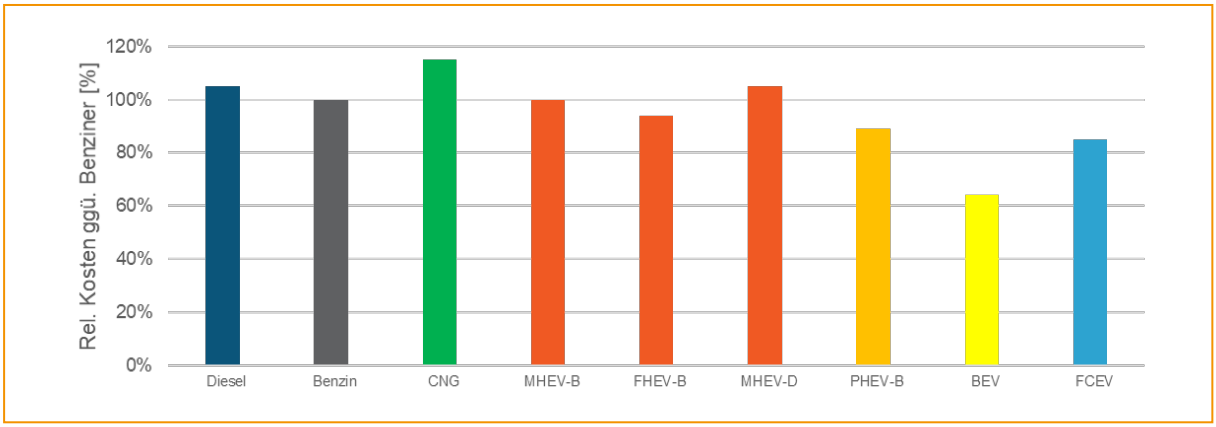


Abbildung 19 - Relative Größenordnungen der Wartungskosten 2020. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 20 zeigt das Gesamtergebnis der Datenerhebung und Validierung in absoluten Zahlen (EUR ct2020/km). Der Wertebereich reicht von 2,74 für einen BEV Kleinwagen bis zu 6,44 ct/km für einen CNG SUV. In den Referenzstudien werden Wertebereiche von 5,3 bis 7,2 ct/km (Propfe et al. 2012), von 1,9 bis 3,3 ct/km (Kasten und Maier 2018), von 3,19 bis 5,43 ct/km (Hacker et al. 2015) oder von 3,4 bis 8,8 c/km (Wietschel et al. 2019) angegeben. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Segment- bzw. Größenklassen zwischen den Studien meist nicht eins zu eins vergleichbar sind, teilweise weitere Kostenbestandteile enthalten sind oder Kostenbestandteile vernachlässigt wurden. Der Vergleich zeigt dennoch, dass die Größenordnung in dieser Studie mit anderen Studien übereinstimmt.

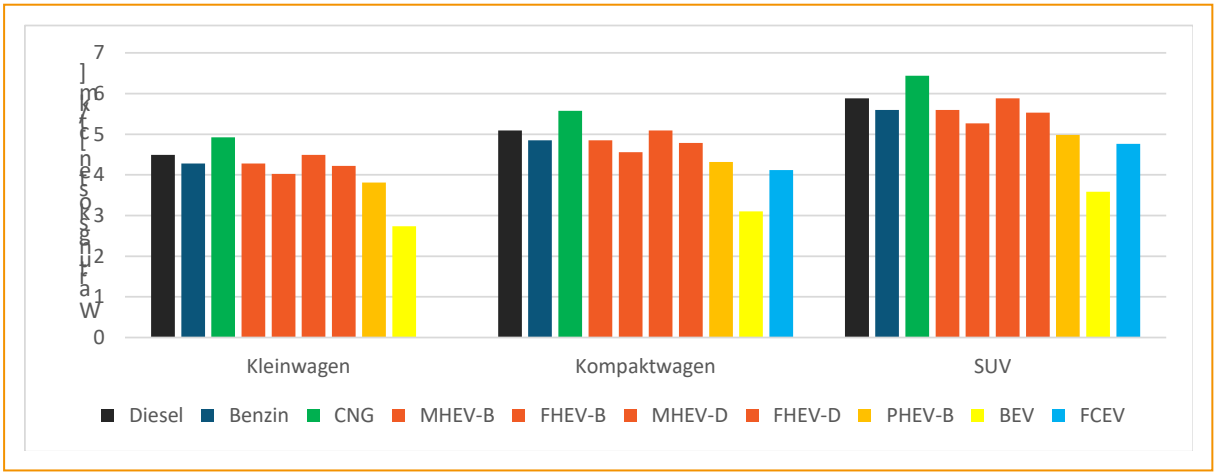


Abbildung 20 - Wartungskosten je Segment und Antrieb im Jahr 2020. Quelle: Eigene Berechnung

2.4.6 Energieträgerkosten

Die Energieträgerkosten in dieser Studie wurden einzeln und bottom-up modelliert. Dies bedeutet, dass konventionelle Kraftstoffe auf Rohöl- oder Erdgasbasis, Kraftstoffe aus biogenen Rohstoffen oder synthetische hergestellte Energieträger jeweils getrennt kalkuliert werden. Tabelle 13 zeigt in einer Übersicht, welche Energieträger im Detail betrachtet wurden.

Kraftstoff	Fossil	Biogen	Synthetisch
Diesel	Rohölbasis	1st & 2nd Gen. Biodiesel	Pt-Diesel
Benzin / Ethanol	Rohölbasis	1st & 2nd Gen. Ethanol	Pt-Benzin
Gas	Erdgasbasis (CNG)	1st & 2nd Gen. (CBG)	Pt-G (CSG)
Wasserstoff	Dampfreformierung	-	Pt-H2

Tabelle 13 - Übersicht der betrachteten Kraftstoffe und Gestehungspfade

Abbildung 21 zeigt das grundlegende Schema der Modellierung. In allen Fällen bilden die Gestehungskosten- bzw. Rohstoffkosten die Ausgangsbasis der Kostenmodellierung. Darauf aufbauend wurden entsprechende Wagniskapitel und Gewinnaufschläge im Sinne eines Deckungsbeitrags aus Sicht der Raffinerie bzw. allgemein des Produzenten erhoben. Insofern keine inländische Produktion in Deutschland erfolgt, werden entsprechende Transportkosten via Schiff oder Pipeline, je nach Energieträger, angesetzt. Auf die so resultierenden Importkosten werden Kosten für den innerdeutschen Transport, Lagerung und Verwaltung aufgeschlagen, um die Bereitstellkosten an der Tankstelle zu erhalten. Auf diese wiederum werden Kosten für Vertrieb sowie Gewinnmargen der Tankstellenbetreiber aufgeschlagen. Weiterhin werden Komprimierungsverluste bei gasförmigen Energieträgern berücksichtigt. Um aus den Bereitstellkosten an der Tankstelle die Endverbraucherpreise abzuleiten, werden Steuern, Umlagen und Abgaben sowie ergänzende Kostenbestandteile für die Tankstelleninfrastruktur eingerechnet. Letztere werden dabei nur bei gasförmigen Energieträgern berücksichtigt. Aus dieser Logik heraus ergeben sich für jeden Energieträger die Preise an der Tankstelle. Der Endverbraucherpreis, welchen die Kunden beim Tanken bezahlen, ergibt sich am Ende durch die Mischungsquote aus konventionellem, biogenem und synthetischem Anteil je Kraftstoff gemäß Prognos Energieszenario (siehe Kapitel 2.3.3)

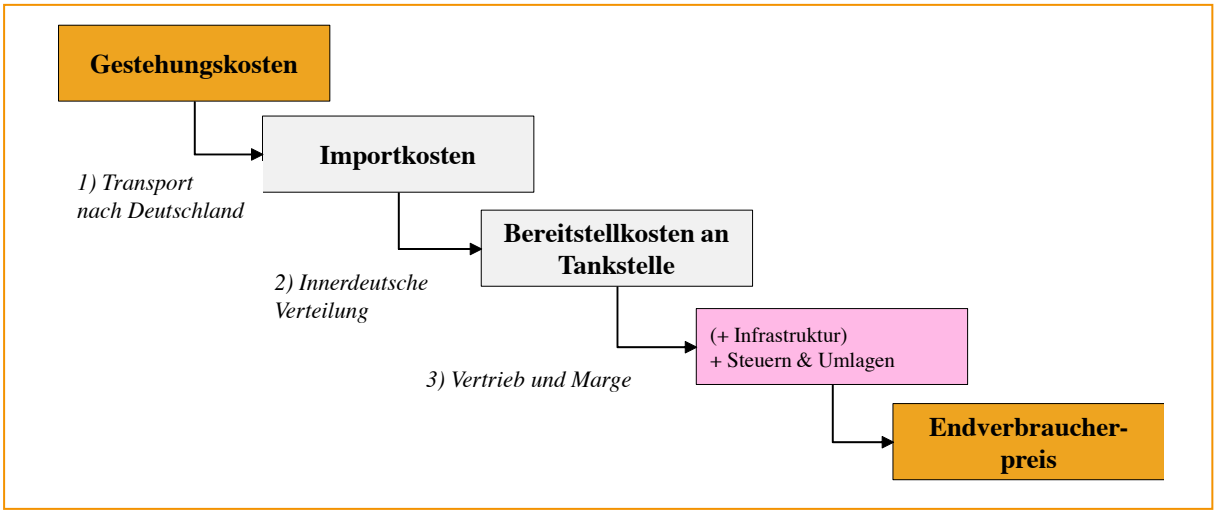


Abbildung 21 - Schema für die Modellierung der Energieträgerkosten. Quelle: Eigene Berechnung

Synthetische flüssige und gasförmige Kraftstoffe

Für die Bestimmung der Gestehungskosten synthetischer Energieträger wurde eine Meta-Analyse verschiedener Studien und wissenschaftlicher Publikationen durchgeführt. Bei der Auswahl der Studien und Szenarien wurde im Besonderen darauf geachtet, dass die Rahmenbedingungen wie bspw. Herkunftsregion zu den in dieser Studie gesetzten Annahmen passen. Selbiges gilt für das zu erreichende CO_2-Reduktionsziel, sofern dieses angegeben oder berücksichtigt wurde. Die einzelnen Datenpunkte der Studien wurden auf die gleiche Realpreisbasis (EUR2020) und gleiche Bezugseinheit (kWh) umgerechnet und anschließend ausgewertet. Bei den synthetischen Energieträgern wurden lediglich Studien nach 2017 herangezogen. Unter anderem sind hier (Prognos AG 2020a), (Perner et al. 2018), (NPM 2020b), (Kramer 2019), (Prognos AG et al. 2018), (Fraunhofer IWES 2017), (dena 2018), (Öko-Institut e.V. 2019) oder (Soler Estralla 2020) zu nennen.

Die Auswahl der Gestehungskosten für diese Studie wurde in enger Anlehnung an die so ermittelten Mediane und Mittelwerte getroffen, um ein möglichst homogenes Gesamtbild und Technologieoffenheit in Anlehnung an die Bestandsentwicklung gemäß Prognos Zielszenario zu gewährleisten. Im Besonderen konnte somit der Einfluss von Extremszenarien zwar berücksichtigt aber dennoch geglättet werden. Beispiele für solche extremen und potentialgetriebenen Szenarien lassen sich unter anderem Prognos AG et al. (2018) oder Kramer (2019) finden, in welchen PtX-lastige Szenarien oder sogar 100%-PtX Szenarien für den Verkehr unterstellt und gerechnet werden. Abbildung 22 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer solchen Betrachtung für synthetisch hergestellte Flüssigkraftstoffe aus der Region mittlerer Osten und Nordafrika (Middle East and North Africa - MENA) im zeitlichen Verlauf von 2020 bis 2050. Visualisiert sind dabei verschiedene Boxplots, welche die Varianz und Streuung der Datenpunkte aufzeigen. Explizit aufgeführt ist der Median für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050. Für konventionelle Kraftstoffe wurde abweichend auf die Modellierung anhand des Rohölpreises nach IEA (2019b) zurückgegriffen. Dies wird in ähnlichen Studien wie (Prognos AG et al. 2021) ebenfalls herangezogen.

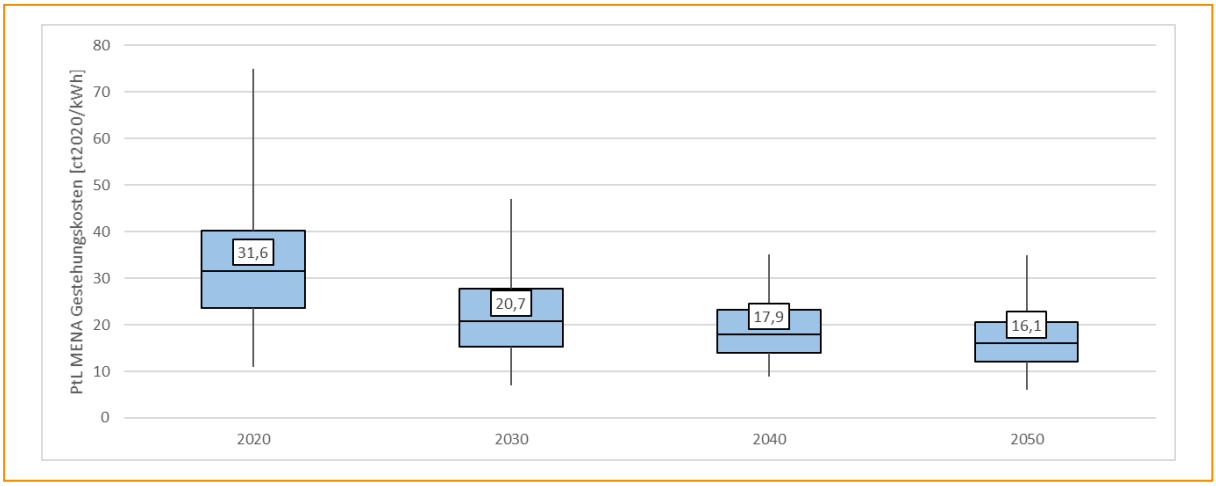


Abbildung 22 - Pt-L Gestehungskosten in der MENA-Region. Quelle: Eigene Berechnung

Biogene flüssige und gasförmige Kraftstoffe

Für biogene Energieträger wurde analog eine entsprechende Analyse durchgeführt, allerdings konnte hier die Meta-Analyse nicht im zeitlichen Verlauf durchgeführt werden. Hier war die Datenbasis geringer, weshalb auch Studien bis 2002 herangezogen wurden. Zwei Drittel der ausgewerteten Studien ist nach 2010 erschienen und ein Drittel nach 2017. Bei der Auswahl der Studien wurde im Besonderen auf die Herkunft der Ausgangstoffe und der damit verbundenen Kosten geachtet, um wesentliche Vorgaben hinsichtlich Primärquellen oder bspw. das Phase-Out von Palmöl (gemäß REDII) umzusetzen. Eine exakte Zuordnung auf die einzelnen biogenen Ausgangsstoffe war jedoch nicht in allen Studien eindeutig möglich. Die Auswahl der Gestehungskosten fand ebenfalls in Anlehnung an die so ermittelten Mediane und Mittelwerte statt. Abbildung 23 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer solchen Betrachtung für Biomethan. Hier wird im Besonderen auf die Studie im Auftrag des Biogasrats e.V. verwiesen (Wietschel et al. 2019). Als Rohstoffe für Biogas werden nachwachsende Rohstoffe (NawaRo), Gülle, Stroh sowie organische Reststoffe angenommen. Bei der zukünftigen Modellierung wird aufgrund höherer Nachfrage ein moderater Anstieg aller biogenen Rohstoffe bis 2030 nach Millinger (2018) unterstellt. Für das Ausgangsjahr 2020 liegen die reinen Gestehungskosten als Ergebnis dieser Analysen im Mittel bei 5,4 ct/kWh (grünes Kreuz), und inklusive Deckungsbeitrag bei etwa 6 ct/kWh. Bis 2030 wird ein Anstieg der Gestehungskosten auf 6,18 ct/kWh angenommen. Zuzüglich entsprechender Abgaben und Umlagen ergeben sich in der weiteren Berechnung für 2020 somit Bereitstellkosten von 8,7 ct/kWh, exklusive Steuern. In Edel et al. (2019) werden unter Betrachtung verschiedener Ausgangsstoffe, Bereitstellungspfade und Produktionsmengen Kraftstoffkosten zwischen 3,44 und 11,83 ct/kWh angegeben, insofern 8% Verflüssigungsverluste für LNG statt CNG berücksichtigt werden.

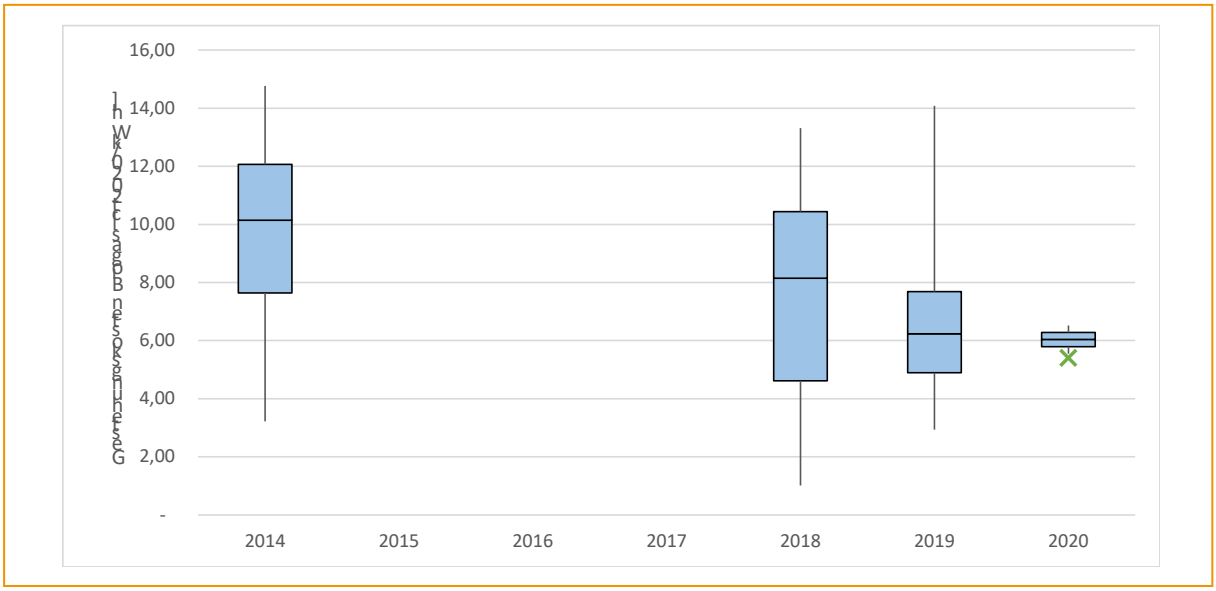


Abbildung 23 - Gestehungskosten Biomethan. Die grüne Linie zeigt die für diese Studie angenommene Referenz. Quelle: Eigene Berechnung

Weitere Kostenbestandteile

Die Modellierung weiterer Kostenbestandteile erfolgt auf Basis verschiedener Literaturquellen. Insbesondere sind dabei Perner et al. (2018), Prognos AG (2020a), Öko-Institut e.V. (2019) oder Fraunhofer ISI et al. (2018) als Quellen zu nennen. Die berücksichtigten und erhobenen Kostenbestandteile für beispielsweise die Transportkosten nach Deutschland, Kosten für innerdeutsche Verteilung, Vertriebskosten, Gewinnaufschläge der Raffinerien, Margen an der Tankstelle, Netzentgelte oder Konzessionsabgaben sind dabei meist explizit für konventionelle Kraftstoffe angegeben. Diese werden äquivalent für die entsprechenden synthetischen oder biogenen Alternativen eingerechnet. Um etwaige Veränderung des spezifischen Energiegehalts oder der Dichte gegenüber der konventionellen Referenz zu berücksichtigen, wurden alle Kostenkomponenten in €2020/kWh berechnet. Eine Übersicht der verwendeten Beträge ist im Anhang aufgeführt. Sofern nicht anders angegeben wurde angenommen, dass die genannten Kostenparameter real konstant bleiben.

Bei den Steuern werden die Mehrwertsteuer, Energiesteuer und CO_2-Steuer als Preisbestandteile berücksichtigt. Für erstere wird bis 2050 ein konstantes Niveau von 19% angenommen. Die Energiesteuer wird gemäß des Bundesfinanzministeriums (BMF) als nominale Steuer modelliert, wodurch real der Einfluss im zeitlichen Verlauf sinkt und die Steuer somit an Bedeutung verliert. Bei den flüssigen Energieträgern wird keine Änderung der Energiesteuer zwischen 2020 und 2050 vollzogen. Somit bleibt ein Steuersatz von 65,45 Cent pro Liter Diesel und 47,04 Cent pro Liter Benzin im zeitlichen Verlauf konstant. Analog zu den Kostenbestandteilen wird diese Steuer entsprechend auch auf die synthetischen und biogenen Kraftstoffe erhoben. Bei gasförmigen Energieträgern wird die Energiesteuer von 1.39 ct/kWh in 2020 auf 3.19 ct/kWh ab 2027 erhöht, da die entsprechende Vergünstigung gemäß aktueller Informationslage ausläuft (Bundestag 2019). Ab 2027 wird auch hier von einem konstanten Niveau bis 2050 ausgegangen. Für die Berechnung der CO_2-Abgabe wird entweder die entsprechende CO_2-Äquivalente des Endprodukts herangezogen oder der CO_2-Preis gemäß der zur Herstellung verwendeten Rohstoffe angerechnet. Bei Biokraftstoffen der ersten Generation werden mindestens 75% Einsparung gegenüber dem konventionellen Energieträger berücksichtigt. Bei Biokraftstoffen der zweiten Generation werden mindestens 90% Einsparung angesetzt (Expertenannahme der dena entsprechend der THG-Einsparungen nach (BLE 2020). Bei synthetisch-

hergestellten Energieträgern wird keine CO_2-Abgabe erhoben. Die absolute Höhe der nominalen CO_2-Steuer wird, wie in Kapitel 2.3.3 genannt, aus Prognos AG et al. (2021) entnommen.

Abbildung 24 zeigt den zeitlichen Verlauf der Endverbraucherpreise für Diesel bzw. Biodiesel, Benzin bzw. Bioethanol und Erdgas bzw. Biogas im zeitlichen Verlauf von 2020 bis 2050. Die berechneten Preise für 2021 liegen bei 1,329 €/l Diesel, 1,469 €/l Benzin und 1,293 €/kg Gas. Bis 2050 ergeben sich Preissteigerungen von knapp 80% beim Diesel, 49% beim Benzin und 38% beim Gas. Der Verlauf ist dabei abhängig vom Verlauf der Gestehungs- bzw. Rohstoffkosten, der Mischungsquote aus konventionellem, biogenem und synthetischem Anteil pro Jahr, der Mischungsquote von Biokraftstoffen der ersten und zweiten Generation, sowie insbesondere der CO_2-Abgabe.

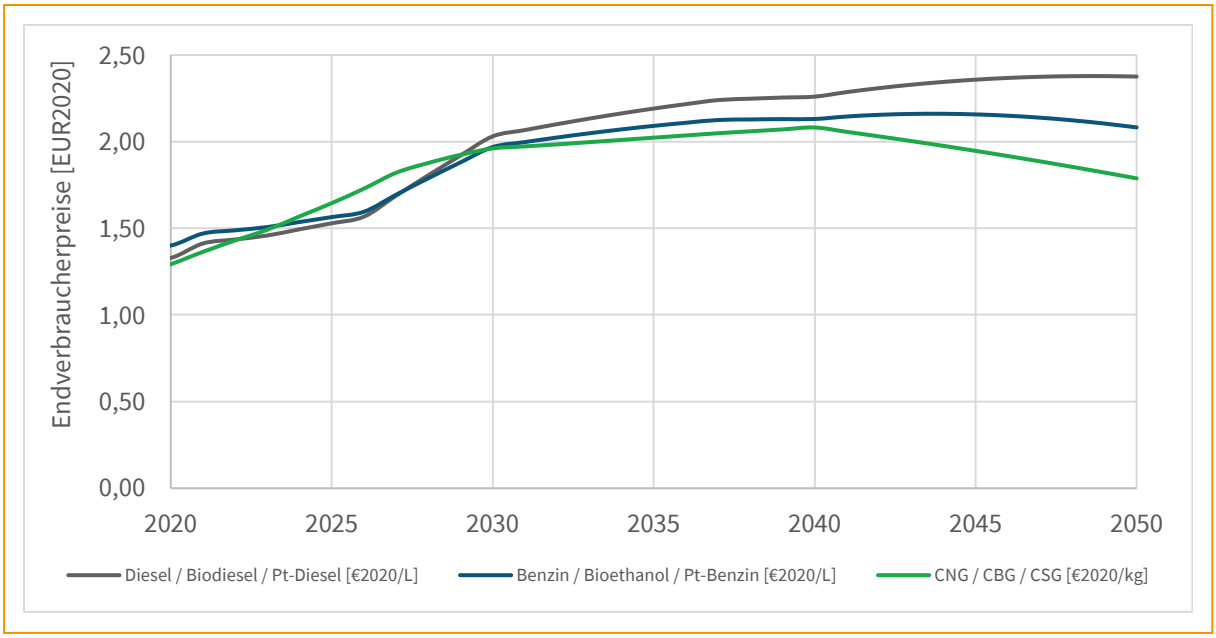


Abbildung 24 - Endverbraucherpreise Diesel, Benzin und Gas. Quelle: Eigene Berechnung

Wasserstoff

Für Wasserstoff erfolgt die Modellierung grundsätzlich analog zu den anderen Energieträgern. Wie in Abbildung 25 aufgeführt, wird ebenfalls ein synthetischer und ein konventioneller Erzeugungspfad betrachtet. Für letzteren wird insbesondere erneut auf die Meta-Analyse zur Berechnung der Gestehungskosten verwiesen. In Anlehnung an das Prognos-Rahmenszenario und aufgrund der geringen nachgefragten Mengen im Verkehr wird von einer heimischen Produktion von synthetischem Wasserstoff ausgegangen. Gemäß Prognos AG (2020a) ist dieser Gestehungspfad auch aufgrund der Vermeidung von hohen Transportkosten nach Deutschland mit einhergehenden Verflüssigungsverlusten und -Kosten durchaus kostenkompetitiv gegenüber anderen Erzeugungsregionen wie bspw. der MENA-Region. Die Modellierung der Kosten, Abgaben und Steuern erfolgt in Anlehnung an andere gasförmige Energieträger. Im Besonderen zeigte sich bei der Modellierung eine Sensitivität der Preise gegenüber den angesetzten Transportkosten und gegenüber den Aufschlägen für den Betrieb einer Tankstelleninfrastruktur. Beide Kostenkomponenten sind dabei explizit abhängig von der nachgefragten Wasserstoffmenge bzw. entsprechend der Anzahl an FCEV. Gemäß Zielszenario 1 liegt der Bestand an FCEV in 2030 bei 100.000 und in 2050 bei 1.400.000 Fahrzeugen (siehe Kapitel 2.3.3). Diese vergleichsweise geringen Stückzahlen erhöhen die

durchschnittlichen Kosten. Beide Kostenfaktoren werden im Folgenden kurz diskutiert. Alle Kostenbestandteile sind im Anhang aufgeführt.

Beim Transport von Wasserstoff können grundsätzlich 3 Modi und mit einhergehenden spezifischen Kosten unterschiedenen werden: (1) Flüssigtransport via LKW; (2) LKW-Transport in Druckgasbehältern sowie (3) Transport im Pipelinenetz (NPM 2020a). Bei letzterem ist zu beachten, dass die beigemischte Menge an H2 ins Gasnetz beschränkt ist (Robinius et al. 2018) und dass der Aufbau eines reinen H2-Netzes aktuell aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur für abgegrenzte Regionen angedacht wird. Nach Robinius et al. (2018) liegen die Kosten für den Transport bei etwa 3 bis 4 ct/kWh für den LKW-Transport in Druckgasbehältern. Andere Studien wie Prognos AG (2020a) gehen von rund 1,9 ct/kWh aus, in Öko-Institut e.V. (2019) werden je nach Szenario 0,6 bis 2,4 ct/kWh veranschlagt und in Soler Estralla (2020) werden je nach Modus zwischen 2,55 und 10,2 ct/kWh aufgeführt. In NPM (2020b) und NPM (2020c) werden abhängig vom Transportmodus zwischen 1,02 und 9,86 ct/kWh genannt. Neben den unterschiedlichen Transportmodi führen auch unterschiedliche Annahmen hinsichtlich der Transportdistanzen zu den hohen Spannbreiten. Konsolidiert ergibt sich über alle Transportpfade (per Lkw) ein Korridor zwischen etwa 3 und 4,5 ct/kWh. In Robinius et al. (2019) werden Transportkosten für die Pipelineinfrastruktur einer landesweiten Versorgung von 0,6 bis 1,7 ct/kWh angenommen. Aufgrund der geringen Anzahl an Fahrzeugen wird im Rahmen dieser Studie eine Ertüchtigung und Ausbau der Pipeline-Infrastruktur nicht betrachtet. Bei einer möglichen breiten Nutzung von Wasserstoff in verschiedensten Sektoren und Anwendungen, wie sie aktuell auch im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie angedacht wird, könnte dies allerdings eine wirtschaftliche Option darstellen. Im Rahmen dieser Studie werden Transportkosten für den LKW-Transport in Druckgasbehältern mit 4 ct/kWh in 2020 und bis 2050 auf 3.5 ct/kWh angenommen.

Ähnlich verhält sich die Abhängigkeit der Infrastrukturkosten, welche auf den Preis umgelegt werden, um einen wirtschaftlichen Betrieb der Tankstellen gegenüber den wenigen Fahrzeugen zu sichern. Hier werden in dieser Studie nur sehr geringe Kosten von 10 ct/kWh für CAPEX und OPEX einer Wasserstofftankstelle als real konstant bis 2040 angenommen. Danach werden diese bis 2050 auf 8 ct/kWh gesenkt. Nach (Robinius et al. 2018) sind bei nur 100.000 Fahrzeugen reine Tankstelleninfrastrukturkosten von sogar 30 ct/kWh bzw. 10 €/kg H_2 anzusetzen. Bei einer Million Fahrzeugen sinken die Kosten auf etwa 10 ct/kWh ab und bei über 20 Millionen Fahrzeugen auf unter 5 ct/kWh, was jedoch bezogen auf Kilogramm Wasserstoff immer noch mehr als 1,50 € entspricht. In NPM (2020b) werden Kosten für Wasserstofftankstellen von 1 Mio. € bei einer Zapfstelle und 1.000 kg / Tag Betankungskapazität zwar genannt, jedoch nicht explizit auf den Wasserstoffpreis umgerechnet. Eine langfristig höhere Auslastung der Tankstellen- sowie Transportinfrastruktur könnte durch eine gemeinsame Nutzung der H_2-Infrastruktur mit wasserstoffbetriebenen schweren Nutzfahrzeugen geschaffen werden, insofern auch technische Unterschiede wie bspw. Druckniveau und H_2 Tankkapazität (Rose 2020) überwunden werden können.

In Summe ergibt sich somit der in Abbildung 25 gezeigte Wasserstoffpreis an der Tankstelle. Bis 2030 wird angenommen, dass der heute gesetzte Marktpreis von 9,5 €/kg H_2 bestehen bleibt. Es zeigt sich, dass grauer Wasserstoff bereits heute kostendeckend zu diesem Preis angeboten werden kann. In 2030 kostet synthetischer Wasserstoff an der Tankstelle bei voller Umlage der Kosten und Steuern jedoch 13,5 €/kg und in 2050 noch immer über 10€/kg H_2. Im Vergleich zu anderen Studien zeigen sich insbesondere durch Infrastruktur und Transport stark erhöhte Preise an der Tankstelle. Werden die Transportkosten für Pipelinetransport mit 1,5 ct/kWh angenommen und würden Infrastrukturkosten vernachlässigt werden, läge der Preis in dieser Studie in 2030 bei 9,33 €/kg und in 2050 bei 6,7 €/kg H_2, womit ein harmonischer Übergang aus dem heute und bis 2030 fixierten Marktpreis von 9,5€/kg möglich wäre. Nicht eingerechnet sind in dieser

exemplarischen Rechnung zusätzliche Netzentgelte und Konzessionsabgaben für die Nutzung der Pipelineinfrastruktur. In NPM (2020c) werden Zielpreise von 4,67 bis 9,33 €/kg H_2 aufgeführt, was die grundsätzliche Plausibilität der Pt-H2 Gestehungskosten und der Modellierung der weiteren Abgaben und Umlagen bestätigt. Die Berücksichtigung der Transportkosten je nach Transportmodus sowie die Umlage der Tankstelleninfrastrukturkosten bleiben dennoch zu diskutieren.

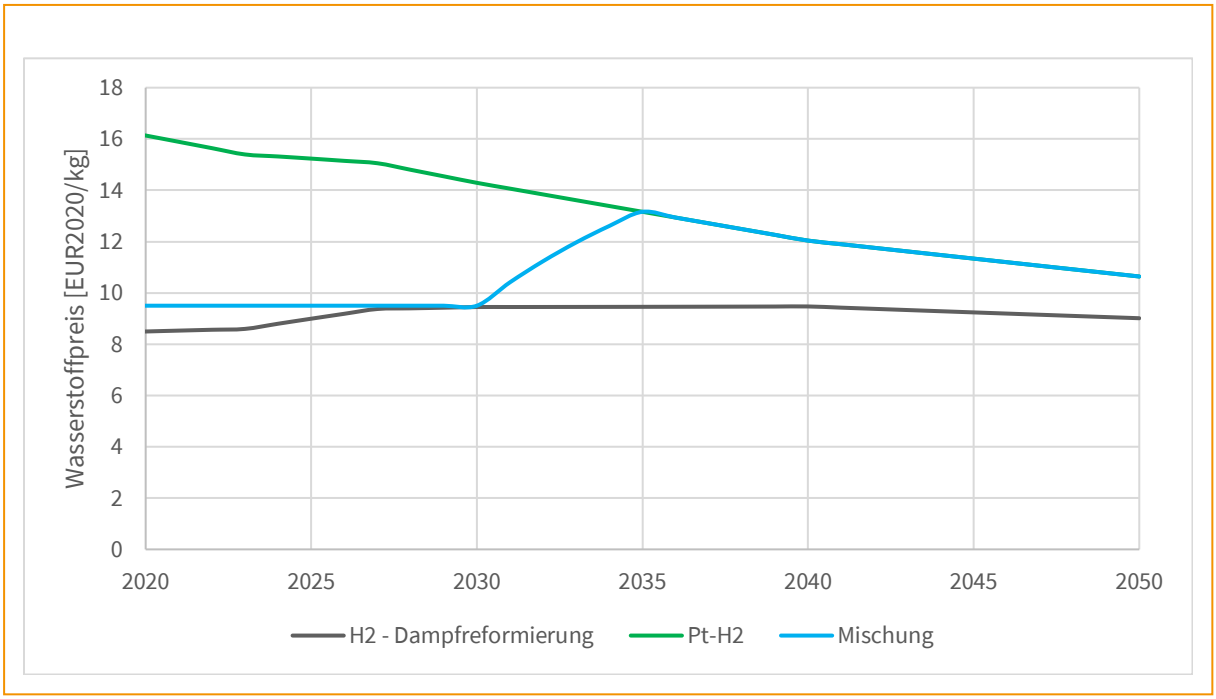


Abbildung 25 - Endverbraucherpreise Wasserstoff. Quelle: Eigene Berechnung

Strom

Für die Modellierung der Stromkosten können zwei unterschiedliche Kostenpfade betrachtet werden. Einerseits werden die Strompreise für Haushaltsstrom (HH), für Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) und industrielle Grobabnehmer (IND) betrachtet. Andererseits werden Preise für öffentliches Laden mit verschiedenen Leistungsstufen eingerechnet. In Anlehnung an Kapitel 2.3.2 wird hier zwischen AC, DC und HPC unterschieden. Durch das Ladeverhalten je Nutzergruppe und je Fahrzeugtyp (BEV oder PHEV) kann somit über die einzelnen Anteile ein resultierender Gesamtpreis im zeitlichen Verlauf von 2020 bis 2050 berechnet werden. Als zusätzliche Sensitivität wird weiterhin der Einfluss von EE-Stromtarifen betrachtet. Bei den Stromtarifen wird zusätzlich die Option der Lastflexibilität gemäß der geplanten §14a EnWG Reform berücksichtigt. Ab 2021 wird dieser Bonus als linear ansteigend bis 2030 angenommen. Ab 2030 wird ein Bonus von 5ct/kWh berücksichtigt durch Vergünstigungen bei Netzentgelten, Konzessionsabgabe und Umlagen. Für den Gewerbestrom wird anteilig an den dort zu entrichtenden Entgelten eine Vergünstigung von 3ct/kWh berücksichtigt.

Die Strompreise für HH, GHD und IND werden aus dem Zielszenario 1 nach Prognos entnommen, in welchen entsprechende Umlagen, Steuern und Verläufe bereits eingerechnet sind, ebenso wie der Ausbau erneuerbarer Energien und von Speichern (Prognos AG et al. 2021). Der IND Strompreis wird dabei in dieser Studie nicht weiter explizit berücksichtigt. Für das private Laden zu Hause wird der HH-Stromtarif herangezogen. Für Laden beim Arbeitgeber und das gewerbliche Laden der Flotte wird der GHD-Strompreis herangezogen. Für 2020 ergeben sich daher Stromkosten von 23.8 ct/kWh für GHD und 32.3 ct/kWh für HH.

Durch die höhere Stromnachfrage und Bereitstellung ist der Strompreis für GHD entsprechend niedriger als der HH-Stromtarif. Der entsprechende IND-Stromtarif läge bei 18.9 ct/kWh. Im zeitlichen Verlauf gibt es entsprechende Schwankungen und bis 2050 ist eine moderate Preissteigerung auf 24.7 ct/kWh für GHD und 34.5 für HH hinterlegt. Um den Einfluss von EE-Stromtarifen zu evaluieren wurde eine zusätzliche Marktanalyse durchgeführt. In Anlehnung an Wietschel et al. (2019) wurden verschiedene EE-Stromanbieter wie NATURSTROM, Greenpeace Solarstrom plus oder Greenpeace Ökostrom aktiv analysiert und der Mehrpreis gegenüber heutigen konventionellen Tarifen bestimmt. Dieser Mehrpreis liegt demnach bei rund 4.6% in 2020. Gemäß steigendem EE-Anteil im Strom gemäß Zielszenario wird angenommen, dass dieser Aufschlag bis 2030 linear abnimmt und dann ganz verschwindet.

Wie in Kapitel 2.3.2 dargestellt laden Nutzer von BEVs und PHEVs zu einem nennenswerten Anteil an öffentlichen Ladesäulen. Die Preise für das Laden unterscheiden sich hier einerseits von Anbieter zu Anbieter, andererseits aber vor allem in Abhängigkeit von der Ladeleistung. Je höher die Ladeleistung, desto teurer ist für den Anbieter das Errichten der Ladesäule, was an der deutlich teureren Hardware und an der teilweise erforderlichen Netzertüchtigung liegt. Das Stromnetz ist an vielen Stellen nicht für Anschluss und Nutzung mehrerer Ladesäulen mit hoher Ladeleistung ausgelegt. Vom Verlegen zusätzlicher Stromleitungen über die Errichtung neuer Spannungstransformatoren können hier zahlreiche aufwendige und teure Maßnahmen erforderlich sein (Funke 2018), die die Kosten erhöhen.

Grundsätzlich wurden die Preise für öffentliches Laden anhand einer umfassenden Marktanalyse bestimmt (Stand: Dezember 2020, u.a. ADAC (2020c) und Energieheld (2020)). Dabei wurden etwa 40 Tarife in den verschiedenen Leistungsstufen herangezogen. Tarife mit Grundgebühr wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht betrachtet. Tabelle 14 zeigt den Mittelwert sowie ermittelte Minima und Maxima je Leistungsstufe. Es zeigt sich, dass es hohe Unterschiede zwischen den Anbietern gibt. Als Basiswerte für 2020 werden gerundete Werte von 40 ct/kWh für AC-Laden, 45 ct/kWh für DC-Laden und 80 ct/kWh für HPC herangezogen. Diese Annahmen sind plausibel vor allem auch vor dem Hintergrund, dass Anbieter wie die EnBW ihre Tarife (AC 39 ct/kWh, DC 49 ct/kWh) nicht nur an eigenen Ladepunkten, sondern in einem Roamingnetz von 100.000 Ladepunkten anbieten. Auch der ADAC bietet einen entsprechenden Roamingtarif (AC 29 ct/kWh, DC 39 ct/kWh) an (ADAC 2020c). Es ist hervorzuheben, dass die genannten DC-Tarife an einigen Ladepunkten auch HPC umfassen (bis 300 kW bei der EnBW und bis 350 kW bei Allego). Außerdem ist bei HPC ist zu betonen, dass die genannten Preise in der Regel nur für markenfremde Nutzer bzw. Nicht-Kunden gelten. IONITY als von mehreren deutscher Automobilherstellern und Ford gegründeten Ladenetzbetreiber ruft bei Kunden der Hersteller maximal Preise von 33 ct/kWh auf, die in der Regel jedoch mit monatlichen Grundgebühren verbunden sind. Daher stellen 80 ct/kWh eine konservative Annahme dar, vor allem auch vor dem Hintergrund, dass durch Batteriepufferspeicher an HPC-Ladestationen der mit hohen Kosten verbundene Netzausbau vermieden werden kann. Für entsprechende Konzepte werden 26 ct/kWh veranschlagt (energate messenger 2020).

Für die Modellierung der zukünftigen Marktpreise für öffentliches Laden wurden die jeweiligen Preise mit der Entwicklung des GHD Strompreises (70%) und des IND Strompreises (30%) korreliert. Zwar wird die bisherige starke Subventionierung des Ladeinfrastrukturausbaus mittelfristig zurückgefahren, was einen preissteigernden Effekt auf die Marktpreise haben könnte, jedoch steigt andererseits mit zunehmender Auslastung der Ladesäulen deren Wirtschaftlichkeit, wodurch wiederum preissenkende Effekte zu erwarten sind. So liegen die Kosten für den Ausbau der Ladeinfrastruktur inklusive Netzausbau (auch von HPC-Infrastruktur) zwischen 0,2 und 60 ct/kWh, in Abhängigkeit von der Auslastung (Robinius et al. 2018; Bünger

et al. 2019). Insgesamt wird im Rahmen dieser Studie davon ausgegangen, dass sich diese beiden Effekte ausgleichen und somit nur der variierende Strompreis die Marktpreise für öffentliches Laden beeinflusst.

Leistungsstufe	Min [ct/kWh]	Mittelwert [ct/kWh]	Basiswert [ct/kWh]	Maximum [ct/kWh]
AC	29	37	**40**	65
DC	34	47	**45**	94
HPC	69	74	**80**	79

Tabelle 14 - Übersicht Preiskorridore für öffentliches Laden. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 26 zeigt exemplarische das Ergebnis der Gesamtmodellierung für den Anwendungsfall privater Halter von BEVs und PHEVs. Die jeweiligen Anteile der Ladeorte sind Abbildung 2 zu entnehmen. Weiterhin ist der Einfluss der EE-Stromtarife für den BEV visualisiert. Als Referenz sind der HH und GHD Strompreis angegeben. Durch die Berücksichtigung der Preise für öffentliches Laden ergibt sich zu Beginn entsprechend ein Preisanstieg gegenüber dem HH-Tarif. Durch den hohen Anteil Heimladung und der unterstellten Lastflexibilität liegt der resultierende Strompreis beim BEV unter dem HH-Stromtarif, trotz der höheren Preise für das öffentliche Laden. Beim PHEV wird, durch einen höheren Anteil des Ladens beim Arbeitgeber mit günstigerem GHD-Strom ein insgesamt günstigerer Stromtarif berechnet.

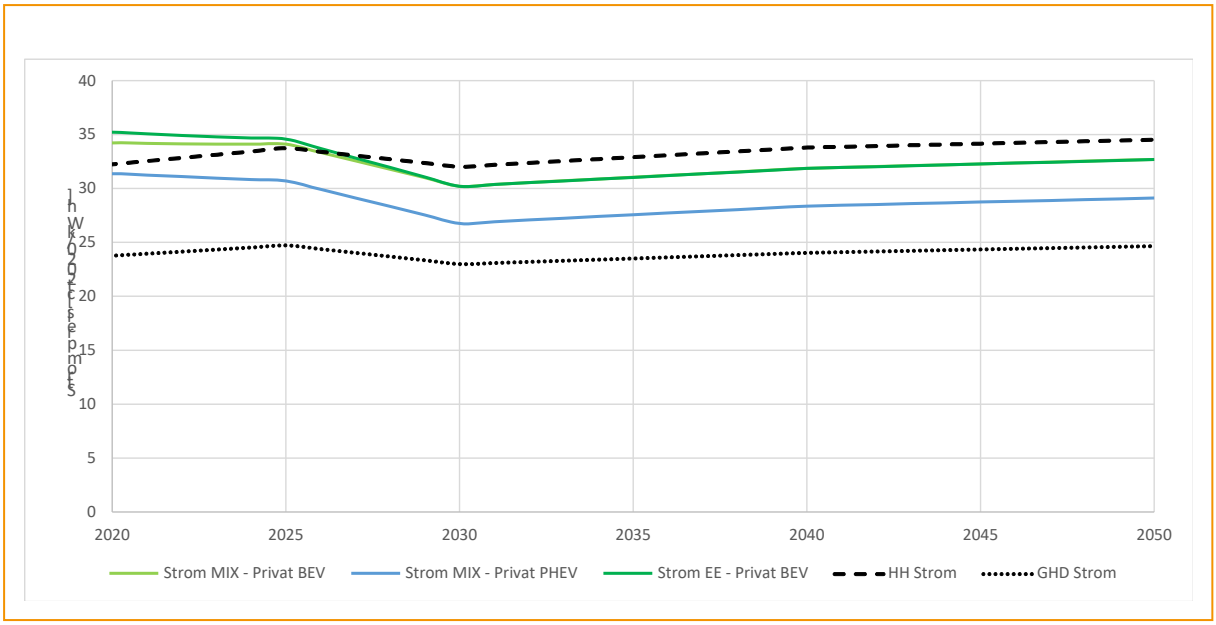


Abbildung 26 - Endverbraucherpreise Strom. Quelle: Eigene Berechnung

2.5 Ökologische Parameter

Stellvertretend für die vielfältigen ökologischen Auswirkungen von Fahrzeugen wird hier die Klimawirkung der verschiedenen Segment-Antriebskombinationen für jeden Schritt der Lebenszyklusanalyse die Kohlendioxidemissionen ermittelt. Diese werden als CO_2-Äquivalent-Emissionen ausgedrückt und unter Verwendung der neuesten Faktoren für das globale Erwärmungspotenzial nach IPCC (2013) für einen Zeithorizont von 100 Jahren und ohne Klimakohlenstoff-Rückkopplung bewertet. Dabei spielt zum Beispiel der eingesetzte Strommix bei der Herstellung des Fahrzeuges oder der zum Einsatz kommende Kraftstoff bei der Berechnung der Fahrenergiebedarfe eine wesentliche Rolle für das Endergebnis. Im Folgenden wird dargestellt, welchen Annahmen in den einzelnen Rechenschritten der LCA bzgl. der THG-Emissionen und des Primärenergiebedarfs zu Grunde gelegt wurden.

2.5.1 Fahrzeugherstellung

Die bei der Herstellung des Fahrzeuges entstehenden CO_2-Emissionen setzen sich aus den drei Baugruppen Rumpf, Antrieb und Speicher zusammen. Die entstehenden spezifischen CO_2-Emissionen bei der Rumpf- und Antriebsherstellung wurden der Studie (Helms et al. 2019b) entnommen. Für die Bestimmung der CO_2-Emissionen bei der Herstellung der Traktionsbatterie wurden die Daten aus (vgl. (Emilsson und Dahllöf 2019)) genutzt. Für 2020 wird mit einer NMC 622 Zellechemie gerechnet und ab 2030 eine NMC811 zu Grunde gelegt. Die Produktionsstandorte für das Referenzjahr 2020 und die Verteilung der Batterieherstellung wurde aus (Hill et al. 2020) entnommen Mit den Anteilen wurde anhand des Online-Datenpools (International Energy Agency 2021) ein mittlerer Stromemissionsfaktor angenommen. Es wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass die Batterieproduktion ab 2030 vollständig in der EU stattfindet. Für den Zeitraum von 2030 bis 2050 wurde eine Linearisierung auf den Wert 0 gCO_2-äq./kWh Batterie vorgenommen, wobei für 2030 der Strommix aus (Energy Environment Agency 2020) entnommen wurde. Die CO_2-Emissionen in kg bei der Herstellung der Fahrzeuge der verschiedenen Fahrzeugsegmente sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Die Emissionen, die bei der Tankherstellung für konventionelle Fahrzeuge und Hybridfahrzeuge entstehen sind in den Emissionen bei der Rumpfherstellung enthalten.

		Rumpf			Antrieb			Speicher			Σ		
		2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
Benzin	A/B	4.774			1.037						5.811		
	C	5.407	-		1.304	-					6.712	-	
	SUV	6.099			1.438						7.537		
Benzin MHEV	A/B	4.774	4.273		1.327	948					6.132	5.247	5.245
	C	5.407	4.839		1.594	1.149		31	26	24	7.033	6.014	6.012
	SUV	6.099	5.458		1.728	1.249					7.858	6.734	6.732
Benzin FHEV	A/B	4.774	4.273		2.263	1.411					7.138	5.769	5.762
	C	5.407	4.839		2530	1.611		102	86	78	8.038	6.536	6.529
	SUV	6.099	5.458		2663	1.711					8.864	7.256	7.249

		Rumpf			Antrieb			Speicher			Σ		
		2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
Diesel	A/B	4.774	-		1131	-					5.905	-	
	C	5.407			1487						6.894		
	SUV	6.099			1.804						7.904		
Diesel MHEV	A/B	4.774	4.273		1.433	1.028		31	26	24	6.238	5.327	5.324
	C	5.407	4.839		1.789	1.295					7.227	6.160	6.158
	SUV	6.099	5.458		2.106	1.533					8.237	7.018	7.016
CN(B)G	A/B	4.774	4.273		872	654		877	465		6.523	5.392	
	C	5.407	4.839		1.268	951		1.121	594		7.796	6.385	
	SUV	6.099	5.458		1.383	1.038		1.224	649		8.707	7.145	
PHEV	A/B	4.774	4.273		2.035	1.251		1.020	1.199	1.099	7.828	6.722	6.622
	C	5.407	4.839		2.750	1.753		999	1.380	1.265	9.156	7.972	7.857
	SUV	6.099	5.458		3.653	2.345		1.029	1.776	1.628	10.782	9.580	9.432
BEV	A/B	4.774	4.273		1.910	993		3.658	4.789	4.390	10.342	10.055	9.656
	C	5.407	4.839		2.374	1.235		4.091	5.699	5.225	11.872	11.773	11.299
	SUV	6.099	5.458		3.391	1.764		4.911	7.774	7.127	14.402	14.997	14.350
FCEV	C	5.407	4.839		2.124[3] 3.306[4]	1.104[2] 2.116[3]		120[5] 1.800[6]	101[4] 954[5]	92[4] 954[5]	12.756	9.114	9.106
	SUV	6.099	5.458		2.236[2] 3.480[3]	1.163[2] 2.227[3]		117[4] 2.268[5]	98[4] 1.202[5]	90[4] 1.202[5]	14.199	10.148	10.141

Tabelle 15 - CO_2-äquivalente Emissionen bei der Herstellung verschiedener Fahrzeugantriebe in verschiedenen Fahrzeugsegmenten an den Betrachtungszeitpunkten 2020, 2030 und 2050

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die bei der Fahrzeugherstellung anfallenden CO_2-äquivalenten Emissionen mit der Fahrzeuggröße und -masse ansteigen. Darüber hinaus ist der hohe CO_2-Fußabdruck bei der Herstellung von Traktionsbatterien zu erkennen. Diese führen bei PHEV und BEV zu hohen CO_2-Emissionen bei der Herstellung, welche deutlich über denen bei der Herstellung konventioneller und leicht elektrifizierter Antriebe liegt. Darüber hinaus ist der Tabelle 15 zu entnehmen, dass die CO_2-äquivalenten Emissionen bei der Fahrzeugherstellung mit der Zeit abnehmen werden, was insbesondere auf einen Strommix mit geringerem Emissionsfaktor sowie einer Verlagerung der Batterieproduktion von Asien nach Europa zurückzuführen ist (vgl. (Energy Environment Agency 2018), (Energy Environment Agency 2020)). Dem entgegen wirkt eine Zunahme der Batteriekapazität bei PHEVs und BEVs

[3] Elektromotor
[4] Brennstoffzelle
[5] Batterie
[6] Druckspeicher (H_2)

2.5.2 Energieträgerherstellung

Bei der Berechnung der entstehenden CO_2-Emissionen bei der Energieträgerherstellung werden die Produktion und Konditionierung sowie die Transformierung an der Energiequelle, der Transport zum und die Transformation am Markt sowie die Vorbereitung und die Verteilung verstanden.

Für die Bestimmung der CO_2-Emissionen bei der Herstellung von Benzin aus Erdöl wurde (Prussi M. , et al., 2020) genutzt. Für die biogenen Benzinbestandteile der 1. Generation wurde ein arithmetisches Mittel der Jahre 2018 bis 2020 aus der Datenerhebung des (Flach et al. 2020) genutzt. Als Ausgangsmaterial wurden dabei Zuckerrüben, Weizen sowie Mais zum Einsatz berücksichtigt. Für Bioethanol der 2. Generation wurde auf Basis einer Expertenschätzung der DENA von einer neunzigprozentigen Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu fossilem Benzin ausgegangen. Für synthetische Bestandteile künftiger Kraftstoffmixe wird davon ausgegangen, dass diese importiert werden. Für den Betrachtungszeitpunkt 2020 wird der Emissionsfaktor für synthetisches Benzin nach (Hänggi et al. 2019) berechnet und bis 2050 ein linearer Übergang zum deutlich CO_2-reduzierten Pfad nach (Prussi et al. 2020) angenommen. Gleiches gilt für synthetische Dieselkraftstoffe. Für synthetische Kraftstoffe wird grundsätzlich vom selben Verteilernetz ausgegangen, wie es für fossile Kraftstoffe der Fall ist.

Die Berechnung der CO_2-Emissionen bei der Herstellung von fossilem Diesel erfolgt ebenfalls nach der Datenlage, welche in (Prussi et al. 2020) dargestellt wird. Die Emissionsfaktoren für biogenen Diesel der 1. Generation wird die Datenerhebung des (Flach et al. 2020) herangezogen. Als Ausgangsmaterialien werden Raps,- Palm- und Sojaöl sowie UCO genutzt. Es wird im Weiteren davon ausgegangen, dass ab 2022 keine UCOs mehr als Basis für biogene Dieselkraftstoffe der 1. Generation mehr genutzt werden. Darüber hinaus wird die Nutzung von Palmöl bis zum Jahr 2026 schrittweise abgesenkt. Für biogene Dieselkraftstoffe der 2. Generation wird analog zur Vorgehensweise bei biogenen Benzinkraftstoffen von einer neunzigprozentigen Reduzierung der CO_2-Emissionen im Vergleich zu fossilem Diesel ausgegangen.

Die Datenlage aus (Prussi et al. 2020) wird ebenfalls für die Bestimmung der CO_2-Emissionen bei der Herstellung von fossilem CNG verwendet. Die Berechnung der THG-Emissionen bei der Herstellung biogenen Methans der 1. Generation erfolgt nach (Prussi et al. 2020), wobei Silomais, sowie Abfälle und Reststoffe als Ausgangsmaterialien dienen. Analog zum Vorgehen bei biogenem Benzin und Diesel wird von einer neunzigprozentigen Reduktion der CO_2-Emissionen bei der Herstellung biogenen CBGs der 2. Generation ausgegangen. Für die Bestimmung der CO_2-Emissionen bei der Herstellung synthetischen CNGs wird ein ähnlicher Pfad zu synthetischem Diesel angenommen. Durch den Wegfall eines Weiterverarbeitungsschrittes steigt der Wirkungsgrad bei der Herstellung jedoch um etwa zehn Prozentpunkte. Für den Transport und die Verteilung von synthetischem CNG wird ein zum fossilen CNG deckungsgleicher Ansatz gewählt, da die Transportentfernungen und Technologien für beide Kraftstoffe kongruent sind.

Die Ermittlung der CO_2-Emissionen bei der Herstellung grauen Wasserstoffs erfolgt hauptsächliche über den Pfad der Erdgas-Dampfreformierung. Die Daten werden aus (Prussi et al. 2020) entnommen. Die Bestimmung der CO_2-Emissionen bei der Herstellung grünen Wasserstoffs über Elektrolyse erfolgt in Abhängigkeit vom Strommix, wobei davon ausgegangen wird, dass dieser Wasserstoff in Deutschland hergestellt wird. Es wird nach (Prussi et al. 2020) von einem Elektrolyse-Wirkungsgrad von gut 64 % ausgegangen.

Der Emissionsfaktor bei der Stromherstellung erfolgt nach (Kemmler et al. 2021).

Die bei der Energieträgerherstellung sowie bei der thermodynamischen Umsetzung entstehenden CO_2-äquivalenten Emissionen in kgCO_2-äquivalent pro hergestellter kWh sind in Tabelle 16 dargestellt.

	2020	2030	2050
Benzin	0,32	0,30	0,05
Diesel	0,32	0,30	0,06
CNG/CBG	0,21	0,08	0,04
Wasserstoff	0,50	0,38	0,07
Strom	0,43	0,22	0,02

Tabelle 16 - CO_2-äquivalente Emissionen bei der Herstellung verschiedener Energieträger an den Betrachtungszeitpunkten 2020, 2030 und 2050

2.5.3 Fahrenergie

Die durch das Fahren entstehenden CO_2-äquivalenten Emissionen werden durch Multiplikation der in Kapitel 2.3.1 dargestellten Fahrenergiebedarfe mit den Emissionsfaktoren der entsprechenden Energieträger berechnet.

2.5.4 Wartung

Für den CO_2-Beitrag der Wartung wurden Daten nach (Helms et al. 2019b) genutzt. Die CO_2-äquivalenten Emissionen pro km können der Tabelle 17 entnommen werden. Für die verschiedenen Betrachtungszeitpunkte wurde keine Veränderung bei den entstehenden CO_2-Emissionen während der Wartung vorgenommen.

	2020
Benzin	0,011
Benzin MHEV	0,011
Benzin FHEV	0,018
Diesel	0,011
Diesel MHEV	0,011
CNG/CBG	0,011
PHEV	0,018
BEV	0,007
FCEV	0,007

Tabelle 17 - CO_2-äquivalente Emissionen in gCO_2-äq. pro km für verschiedene Antriebe

2.5.5 Entsorgung

Bei der Entsorgung eines jeden Fahrzeuges entstehen ebenfalls Emissionen. Diese wurden nach (Helms et al. 2019a) bestimmt, wobei für die Entsorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen keine Daten vorlagen. Es wird daher mit denselben massenbezogenen CO_2-Emissionen wie für BEV gerechnet. In Tabelle 18 sind die CO_2-äquivalenten Emissionen, die bei der Entsorgung für ein Fahrzeug entstehen, in kg CO_2-äquivalent pro Fahrzeug dargestellt.

		2020	2030	2040
Benzin	Kleinwagen	695	-	
	Kompaktklasse	785		
	SUVs	877		
Benzin MHEV	Kleinwagen	717	716	716
	Kompaktklasse	807	806	806
	SUV	899	898	898
Benzin FHEV	Kleinwagen	685	683	662
	Kompaktklasse	766	764	755
	SUVs	849	847	826
Diesel	Kleinwagen	633	-	
	Kompaktklasse	790		
	SUVs	897		
Diesel MHEV	Kleinwagen	653	652	
	Kompaktklasse	811	810	
	SUVs	918	917	
CNG/CBG	Kleinwagen	748	748	
	Kompaktklasse	837	837	
	SUVs	973	973	
PHEV	Kleinwagen	806	807	
	Kompaktklasse	885	907	
	SUVs	971	1031	
BEV	Kleinwagen	1.009	1.038	
	Kompaktklasse	1.141	1.209	
	SUVs	1.339	1.518	

		2020	2030	2040
FCEV	Kompaktklasse	654		
	SUVs	753		

Tabelle 18 - CO_2-äquivalente Emissionen bei der Entsorgung verschiedener Segment-Antriebskombinationen für die Betrachtungszeitpunkte 2020, 2030 und 2040

Es zeigt sich, dass die bei der Entsorgung anfallenden CO_2-Emissionen vom Betrachtungszeitpunkt 2020 bis 2030 für nahezu alle Antriebe leicht ansteigen. Dieses Verhalten ist auf steigende Batteriekapazitäten in den elektrifizierten Antrieben zurückzuführen. Zwischen 2030 und 2040 ist keine Veränderung der CO_2-Emissionen bei der Entsorgung mehr anzunehmen.

2.6 Technische Parameter

Für eine Berechnung des Primärenergiebedarfs des Lebenszyklus eines Fahrzeuges erfolgt zunächst eine Berechnung der Primärenergiebedarfe in den einzelnen Lebensabschnitten des Fahrzeuges. Anschließend werden diese addiert und ein Primärenergiebedarf pro Fahrzeug über den gesamten Lebenszyklus bestimmt.

2.6.1 Fahrzeugherstellung

Analog zur Vorgehensweise in Kapitel 2.5.1 wird bei der Herstellung zwischen der Rumpf-, Antriebs- und Speicherherstellung unterschieden, wobei der Primärenergiebedarf bei der Herstellung des Tanks für Fahrzeuge, welche einen Flüssigkraftstoff nutzen, in der Rumpfherstellung berücksichtigt wird. Die Daten wurden (Yazdanie et al. 2016) entnommen und auf die in Kapitel 2.3.1 definierten Referenzfahrzeuge skaliert. Tabelle 19 zeigt den Primärenergiebedarf für die betrachteten Segment-Antriebskombinationen in MJ pro Fahrzeug. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass der Primärenergiebedarf der Rumpfherstellung für alle Antriebstypen gleich groß ist. Die Berechnung erfolgte analog zur Vorgehensweise, welche in Kapitel 2.5.1 dargestellt ist.

MJ		Rumpf			Antrieb			Speicher			Σ		
		2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
Benzin	A/B	65.954			7.304						73.258		
	C	74.701	-		9.185	-		-			83.886	-	
	SUV	84.265			10.125						94.390		
Benzin MHEV	A/B	65.954			9.727			454	440		76.136	76.122	
	C	74.701			11.608						86.764	86.750	
	SUV	84.265			12.549						97.268	97.254	
Benzin FHEV	A/B	65.954			18.254			1.471	1.425		85.680	85.634	
	C	74.701			20.135						96.308	96.262	

MJ		Rumpf			Antrieb			Speicher			Σ		
		2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
	SUV	84.265			21.076						106.813	106.767	
Diesel	A/B	65.954	-		6.975	-		-			72.929	-	
	C	74.701			9.172						83.874		
	SUV	84.265			11.128						95.394		
Diesel MHEV	A/B	65.954			9.399			454	440		75.807	75.793	
	C	74.701			11.596						86.752	86.738	
	SUV	84.265			13.552						98.272	98.258	
CNG/CBG	A/B	65.954			6.138			400			72.492		
	C	74.701			8.928			511			84.140		
	SUV	84.265			9.739			558			94.562		
PHEV	A/B	65.954			16.566			14.757	19.965		97.277	102.485	
	C	74.701			21.876			14.454	22.979		111.032	119.557	
	SUV	84.265			28.928			14.897	29.581		128.091	142.774	
BEV	A/B	65.954			17.017			52.943	79.761		135.915	162.733	
	C	74.701			21.156			59.201	94.917		155.059	190.775	
	SUV	84.265			30.221			71.077	129.485		185.564	243.972	
FCEV	C	74.701			18.924[7] 28.614[8]			1.731[9] 820[10]	1.677[9] 820[10]		124.790	133.310	
	SUV	84.265			19.920[7] 30.120[8]			1.688[9] 1.033[10]	1.635[9] 1.033[10]		137.026	144.152	

Tabelle 19 - Primärenergiebedarf für die Herstellung der betrachteten Segment-Antriebkombinationen für die Betrachtungszeitpunkte 2020, 2030 und 2040

Es zeigt sich, dass der Primärenergiebedarf bei der Fahrzeugherstellung entsprechend der Fahrzeugmasse zunimmt. Dies lässt sich mit einem größeren Material- und Verarbeitungsaufwand erklären. Darüber hinaus kann Tabelle 19 entnommen werden, dass eine zunehmende Elektrifizierung auf Grund ansteigender verbauter Batteriekapazitäten zu einem steigenden Primärenergiebedarf bei der Herstellung führt, insbesondere da der gravimetrische, spezifische Energiebedarf bei der Batterieherstellung vergleichsweise hoch ist, sodass rein elektrische Fahrzeuge den größten Primärenergiebedarf aufweisen. Eine zeitliche Veränderung des Primärenergiebedarfs bei der Fahrzeugherstellung rührt lediglich von einer Veränderung der Batteriekapazität infolge steigender elektrischer Reichweiten. Gleichzeitig sinkt der gravimetrische,

[7] Elektromotor
[8] Brennstoffzelle
[9] Batterie
[10] Druckspeicher (H_2)

spezifische Energiebedarf bei der Batterieherstellung, sodass bei den mild-hybridisiert Fahrzeugen die größere Batteriekapazität überkompensiert. Für die übrigen Fahrzeugkomponenten wird davon ausgegangen, dass sich der Primärenergiebedarf bei der Herstellung nicht mehr verändert.

2.6.2 Energieträgerherstellung

Für die Bestimmung des Primärenergiebedarfs bei der Herstellung fossilen Benzins wird (Prussi et al. 2020) genutzt. Der Primärenergiebedarf für biogenen Benzinkraftstoff der 1. Generation erfolgt nach (Flach et al. 2020) mit den in Kapitel 2.5.2 dargestellten Ausgangsmaterialen. Die Berechnung des Primärenergiebedarfs bei der Herstellung von biogenem Benzin der 2. Generation erfolgt in Anlehnung an die Berechnung des Primärenergiebedarfs bei Herstellung biogenen Benzins aus Stroh. Gleiches gilt für biogenen Diesel- und Erdgaskraftstoff der 2. Generation.

Die Berechnung des PEB bei der Herstellung von fossilem Diesel erfolgt nach (Prussi et al. 2020). Der Primärenergiebedarf für biogenen Dieselkraftstoff der 1. Generation wird mit den Daten aus (Flach et al. 2020) mit den in Kapitel 2.5.2 dargestellten Ausgangsmaterialen berechnet. Der PEB bei der Herstellung sowohl von synthetischem Benzin als auch von synthetischem Diesel erfolgt nach (Hänggi et al. 2019). Der Energieaufwand für die Verteilung wird dabei an den der Verteilung fossiler Kraftstoffe angelehnt und es erfolgt eine Linearisierung zum Pfad nach (Prussi et al. 2020) bis 2050.

Der PEB bei der Herstellung fossilen CNGs erfolgt nach (Prussi et al. 2020). Für die Bestimmung des Primärenergiebedarfs für biogenes Methan der 1. Generation werden die Daten aus (Flach et al. 2020) mit den in Kapitel 2.5.2 Ausgangsmaterialien genutzt. Für Methan auf biogenes Methan der 2. Generation erfolgt eine Berechnung auf Grundlage der Berechnung des Primärenergiebedarfs bei der Herstellung aus Stroh. Für die Herstellung synthetischen Methans wird von demselben Pfad ausgegangen, wie bei synthetischen Flüssigkraftstoffen, wobei jedoch eine Verarbeitungsstufe entfällt und der Wirkungsgrad des Herstellungsprozesses somit um etwa zehn Prozentpunkte ansteigt.

Die Berechnung des PEB bei der Herstellung grauen Wasserstoffs erfolgt mit Hilfe der Daten aus (Prussi et al. 2020). Für grünen Wasserstoff wird der PEB des eingesetzten Strommix in Deutschland angesetzt. Für die Elektrolyse wird ein Wirkungsgrad von 64 % angenommen (vgl. (Prussi et al. 2020)).

Die Bestimmung des PEB für die Stromproduktion erfolgt nach mit Hilfe des Kraftwerksmix, welcher in (Kemmler et al. 2021) zu Grunde gelegt wird. Die jeweiligen Wirkungsgrade stammen aus (Umweltbundesamt) und die bei der Verteilung anfallenden Netzverluste werden (Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt 2020) entnommen.

Der Primärenergiebedarf in MJ pro erzeugter kWh für die betrachteten Energieträger ist in Tabelle 20 zusammengefasst.

	2020	2030	2040
Benzin	1,01	1,40	5,43
Diesel	1,15	1,55	5,24
CNG/CBG	1,12	3,88	4,85

	2020	2030	2040
Wasserstoff	4,01	4,64	3,66
Strom	1,40	1,01	0,51

Tabelle 20 - Primärenergiebedarf für die Herstellung verschiedener Energieträger an den Betrachtungszeitpunkten 2020, 2030 und 2040

Auf Grund der langen Prozesskette bei der Herstellung weisen biogene und strombasierte Kraftstoffe einen hohen Primärenergiebedarf auf. Wegen der Beimischungen von biogenen und synthetischen Anteilen in die flüssigen Kraftstoffe steigt der Primärenergiebedarf für Benzin und Diesel. Ein ähnliches Verhalten ist bei CNG/CBG zu beobachten. Hier kommt es auf Grund des steigenden Anteils biogener Anteile nach 2030 im Verhältnis zu fossilem Erdgas zu einer Reduzierung des Primärenergiebedarfs. Dabei wurde für CNG/CBG jedoch – methodisch abweichend vom Ansatz des deutschen Kraftwerksmixes für die Strom- und Wasserstoffbereitstellung - auch die dem Verkehr allein per Zertifikat zugerechneten Anteile CBG berücksichtigt. Damit wird rechnerisch ein CBG-Anteil für Gasfahrzeuge von 16 Prozent erreicht, während der physische Anteil nur bei etwa 1 Prozent liegt. Unter Ökobilanzfachleuten wird eine solche Anrechnung von Zertifikaten allerdings kritisch gesehen. Eine Berücksichtigung von etwaigem Ökostrombezug für Elektrofahrzeuge findet dagegen nicht statt.

Bei der Wasserstoffherstellung wird in 2020 nahezu ausschließlich grauer Wasserstoff Erdgas-Dampfreformation genutzt. Dieser weist im Gegensatz zu grünem Wasserstoff, welcher durch Elektrolyse und den aktuellen Strommix hergestellt wird, einen geringeren Primärenergiebedarf auf. Auf Grund des wachsenden EE-Anteils im Strommix, reduziert sich der Primärenergiebedarf des über Elektrolyse hergestellten Wasserstoffs kontinuierlich. Bis 2030 nimmt der Anteil grünen Wasserstoffs zu, entsprechend steigt der Primärenergiebedarf des Wasserstoffmixes, da die Herstellung dieses Wasserstoffs weiterhin höheren Energieeinsatz nach sich zieht. Nach 2030 kehrt sich dieser Trend um, der wachsende Anteil erneuerbarer Energien im Strommix und ein weiter steigender Anteil grünen Wasserstoffs im Mix resultieren in einer leichten Reduzierung des Primärenergiebedarfs bei der Herstellung dieses Energieträgers.

Der steigende EE-Anteil resultiert in einer kontinuierlichen Reduzierung des Primärenergiebedarfs bei der Stromherstellung.

2.6.3 Fahrenergie

Der Primärenergiebedarf für das Fahren berechnet sich als Produkt aus den in 2.3.1 dargestellten Kraftstoff- bzw. Stromverbräuchen mit dem Primärenergiebedarf des zum Einsatz kommenden Energieträgers.

2.6.4 Wartung

Die Bestimmung des Primärenergiebedarfs erfolgt anhand der Daten aus (Helms et al. 2019b). Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass sich der Primärenergiebedarf im Laufe des betrachteten Zeitraums nicht ändert. Tabelle 21 zeigt den Primärenergiebedarf für die Wartung für verschiedene Antriebsformen in MJ pro Kilometer.

	MJ pro km
Benzin	0,152
Benzin MHEV	0,152
Benzin FHEV	0,284
Diesel	0,152
Diesel MHEV	0,152
CNG/CBG	0,152
PHEV	0,284
BEV	0,132
FCEV	0,132

Tabelle 21 - Primärenergiebedarf bei der Wartung verschiedener Fahrzeuge

2.6.5 Entsorgung

Die Berechnung des Primärenergiebedarfs bei der Entsorgung wird mit Hilfe von (Helms et al. 2019b) durchgeführt. Die Entsorgung der Batterie wird dabei auf Grund fehlender Datenlage nicht berücksichtigt. Eine Zusammenfassung des Primärenergiebedarfs für die Entsorgung der betrachteten Fahrzeuge ist in Tabelle 22 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Primärenergiebedarf über den betrachteten Zeitraum nicht ändert. Für Brennstoffzellenfahrzeuge lagen zum Zeitpunkt der Studie keine Daten vor, sodass die Daten für batterieelektrische Fahrzeuge übernommen wurden.

		2020
Benzin	A/B	1206
	C	1361
	SUV	1520
Benzin MHEV	A/B	1160
	C	1356
	SUV	1455
Benzin FHEV	A/B	1210
	C	1356
	SUV	1505
Diesel	A/B	1091
	C	1363
	SUV	1547

		2020
Diesel MHEV	A/B	1119
	C	1391
	SUV	1576
CNG/CBG	A/B	1234
	C	1380
	SUV	1605
PHEV	A/B	1210
	C	1356
	SUV	1505
BEV	A/B	1177
	C	1343
	SUV	1547
FCEV	C	1343
	SUV	1547

Tabelle 22 - Primärenergiebedarf bei der Entsorgung verschiedener Fahrzeuge

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der ökonomischen Betrachtung

In den folgenden Kapiteln werden Ergebnisse der ökonomischen Betrachtung vorgestellt. Es werden die TCO der unterschiedlichen Antriebsalternativen und Kraftstoffe, der Fahrzeugsegmente sowie der Nutzertypen miteinander verglichen. Zusätzlich zum Basisjahr 2020 wird eine Fahrzeuganschaffung in den Jahren 2030 und 2040 analysiert. Im Basisszenario werden die Ergebnisse basierend auf den in den vorigen Kapiteln erläuterten Parametern betrachtet. Darüber hinaus werden Ergebnisse eines Szenarios mit Batteriepreisanpassung sowie eines Szenarios ohne Subventionen, Abgaben und Steuern vorgestellt.

3.1.1 Basisszenario

Das Basisszenario bildet auf Basis der vorgestellten technischen und ökonomischen Parameter die zu erwartenden TCO der verschiedenen Antriebsalternativen, Segmente und Nutzertypen für eine Beschaffung in den Jahren 2020, 2030 und 2040 ab. Die herangezogenen Parameter sind von den getroffenen Annahmen abhängig, wobei im Basisszenario das Set der wahrscheinlichsten Annahmen betrachtet wird. Da der Fokus dieser Studie auf Endkunden bzw. Privatnutzern liegt, werden hier alle Segmente dargestellt. Bei Flottenfahrzeugen und Dienstfahrzeugen wird der Fokus auf die Kompaktklasse als Referenzfahrzeug gelegt. Die TCO von PHEV und BEV wurden auch für den Bezug von Strom aus rein erneuerbaren Energien berechnet. Da die Ergebnisse aber nur minimal von den Ergebnissen mit Strombezug aus dem deutschen Strommix abweichen, werden sie nicht dargestellt.

Kleinwagen - privat

Wie Abbildung 27 zeigt stellt im Jahr 2020 das BEV im Kleinwagensegment in privater Nutzung die wirtschaftlichste Alternative dar. Die hohen Anschaffungskosten von BEVs werden durch die aktuellen Kaufpreissubventionen mehr als kompensiert. Weiterhin können sich BEVs durch geringere Energiekosten, geringere Wartungs- und Reparaturkosten sowie aktuell auch geringere Steuern und Versicherungskosten gegenüber den Alternativen auszeichnen. Anschaffungskosten für private Wallboxen spielen kaum eine Rolle. An zweiter Stelle liegen PHEVs und Gasfahrzeuge. Wo bei PHEVs die Kaufpreissubventionen wesentlich zur hohen Wirtschaftlichkeit beitragen, ist dies bei Gasfahrzeugen auf die geringen Energiekosten zurückzuführen. Die reinen und hybridisierten verbrennungsmotorischen Fahrzeuge stellen 2020 die teuerste Alternative im Kleinwagensegment dar. Ihre TCO-Unterschiede untereinander sind aber sehr gering. Auffällig sind bei diesen die unterschiedlichen Energiekosten.

2030 stellt der FHEV, leicht vor dem Gasfahrzeug die wirtschaftlichste Alternative dar. Geringe Energiekosten und geringe Steuern und Versicherungskosten sind der Hauptgrund hierfür. Weiterhin ist die Batterie des FHEVs deutlich kleiner und damit günstiger als bei BEVs und PHEVs. Aufgrund einer kurzen angenommenen Haltedauer und geringer Jahresfahrleistungen im Kleinwagensegment, können bei EVs die hohen Anschaffungskosten durch geringere Energiekosten kaum ausgeglichen werden. Insgesamt liegen die TCO der Alternativen 2030 aber sehr nahe beieinander, trotz der deutlich höheren Anschaffungskosten von BEVs und PHEVs. Dieses Bild setzt sich auch 2040 fort, wobei aufgrund von sinkenden Anschaffungskosten der BEVs und PHEVs, ausgelöst durch sinkende Batteriekosten, diese zu den FHEVs als wirtschaftlichste Alternative aufschließen. Die TCO von ICEVs steigen 2040 leicht an.

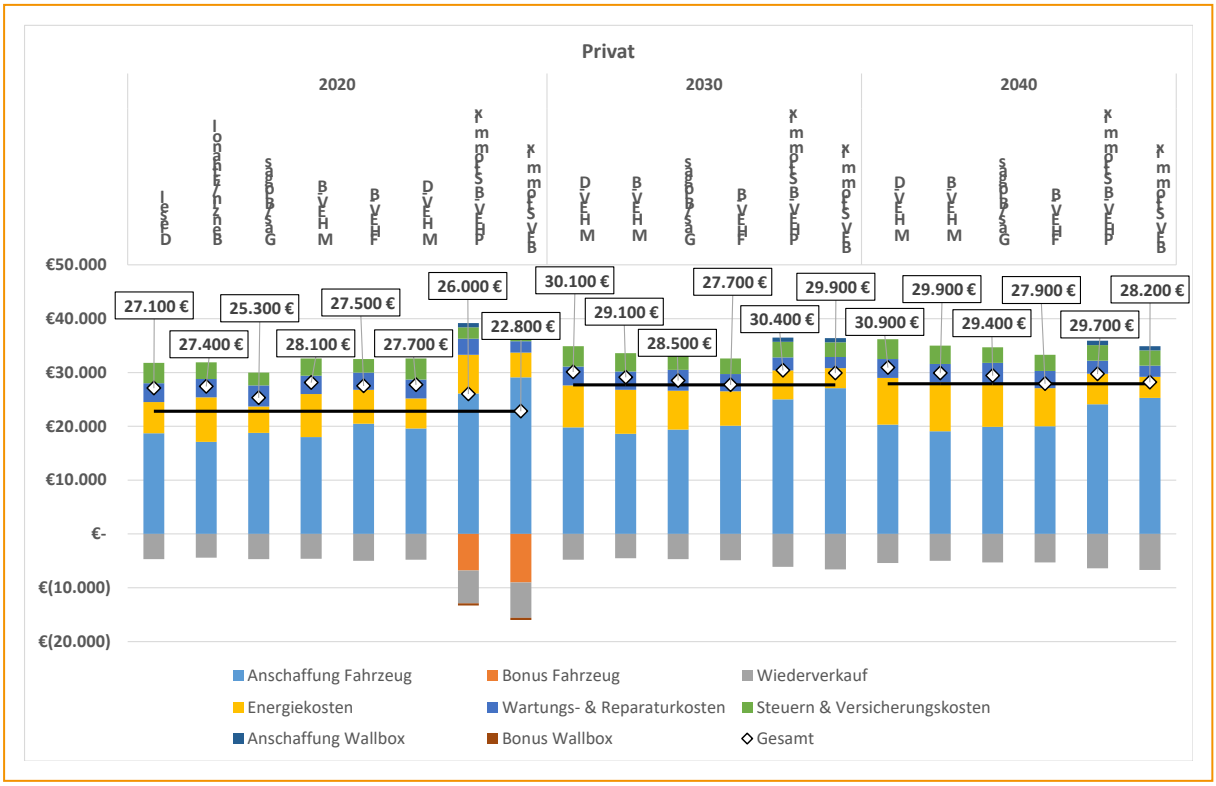


Abbildung 27 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von Kleinwagen - privat im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

Kompaktklasse - privat

Die TCO privat genutzter Kompaktklasse-Pkw im Basisszenario sind in Abbildung 28 dargestellt. Am grundsätzlichen Bild, dass BEVs die wirtschaftliche Alternative darstellen, wie bei privaten Kleinwagen, ändert sich nichts. Weiterhin sind Gasfahrzeuge gemeinsam mit PHEVs an zweiter Stelle einzuordnen. Grund für die hohe Wirtschaftlichkeit von EVs sind wiederum die hohen Kaufpreissubventionen, die die hohen Anschaffungskosten von EVs kompensieren. BEVs zeichnen sich durch ihre geringen Energiekosten, geringen Wartungs- und Reparaturkosten sowie durch geringere Steuern und Versicherungskosten aus. Durch die höheren Jahresfahrleistungen in der Kompaktklasse gegenüber Kleinwagen ist der Vorteil von BEVs bei den Energiekosten deutlicher. Gleichzeitig ist der positive Effekt der Kaufpreissubventionen auf BEVs trotz größerer absoluter Höhe insgesamt geringer. Dies ist auf die deutlich höheren Anschaffungskosten von BEVs in der Kompaktklasse zurückzuführen. Bei Gasfahrzeugen ist hervorzuheben, dass neben geringerer Anschaffungskosten auch die Energiekosten sehr gering und nur wenig höher als die von BEVs sind. Geringe Gaspreise sind hierfür die wesentliche Ursache. PHEVs weisen mit die höchsten Energiekosten auf, was auf den hohen konventionellen, benzinbasierten Fahranteil zurückzuführen ist. Alle konventionellen Antriebsalternativen (Diesel, Benzin, MHEV-D, MHEV-B, FHEV-B) weisen vergleichbare TCO auf. Aus wirtschaftlicher Perspektive scheint die Hybridisierung, zumindest aktuell, nicht vorteilhaft zu sein. Insgesamt liegen die TCO in der Kompaktklasse aber ohnehin sehr nahe beieinander. Einzige Ausnahme bilden FCEVs, welche aufgrund extrem hoher Anschaffungskosten, die durch die Kaufpreissubventionen nicht annähernd amortisiert werden können, mit Abstand die höchsten TCO aufweisen. Deren Energiekosten wären dabei durchaus mit ICEVs vergleichbar.

Im Jahr 2030 gleichen sich die TCO aller Alternativen weiter an. Lediglich FCEVs weisen nach wie vor deutlich höhere TCO auf. Trotz eines Wegfalls der Kaufpreissubventionen und einer deutlichen Reichweiten- und Batteriegrößensteigerung in der Kompaktklasse stellen BEVs zusammen mit FHEVs die wirtschaftlich Alternative dar. FHEVs mit ihren relativ geringen Anschaffungskosten, bei gleichzeitig hohen Energieeinsparpotenzialen, können ihre TCO annähernd halten, wohingegen alle Alternativen teurer werden. PHEVs können 2030 aus TCO-Sicht keine Vorteile gegenüber reinen ICEVs aufweisen. MHEVs als Dieselvariante stellen die unwirtschaftlichste ICEV-Alternative dar. FCEVs zeigen immer noch deutlich höhere TCO als die übrigen Kompaktklasse-Pkw, allerdings können sie insgesamt ihre TCO verringern. 2040 verstärkt sich der wirtschaftliche Vorteil von BEVs gegenüber den Alternativen. Aber auch FHEVs und PHEVs verbessern ihre TCO im Vergleich zu reinen ICEVs. Diese Entwicklung ist im Wesentlichen auf die CO_2-Besteuerung zurückzuführen, welche reine ICEVs in besonderem Maße belastet.

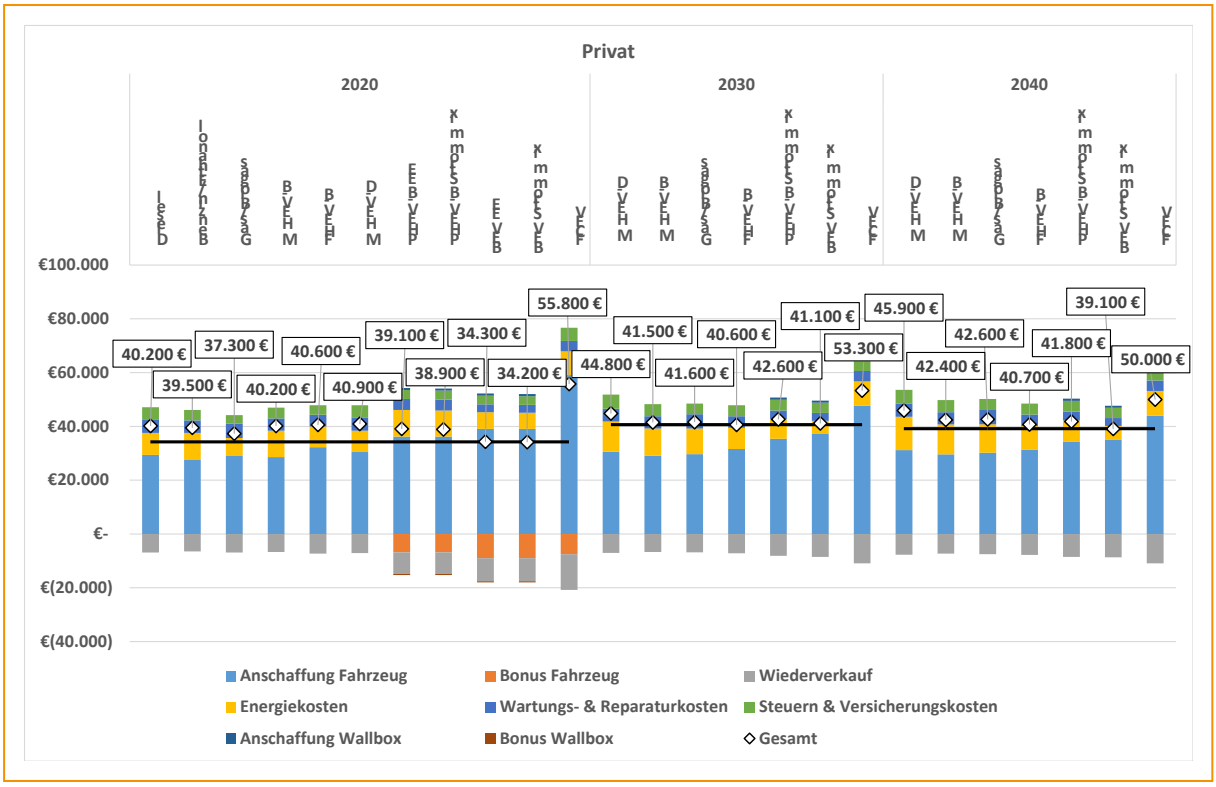


Abbildung 28 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse - privat im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

Abbildung 29 zeigt die kumulierten TCO von privaten Kompaktklassefahrzeugen in Abhängigkeit von der Fahrleistung im Jahr 2020. Es zeigt sich, dass aufgrund geringer Anschaffungskosten zunächst das Benzinfahrzeug am günstigsten ist. Ab einer Fahrleistung von etwa 20.000 km stellt das BEV die wirtschaftlichste Alternative dar. Ab etwa 50.000 km ist auch das Gasfahrzeug günstiger als das Benzinfahrzeug. Mildhybride und Dieselfahrzeuge stellen insgesamt keine wirtschaftliche Option dar. Mit steigender Fahrleistung, auch über die dargestellte Fahrleistung hinaus, werden BEV immer wirtschaftlicher, ebenso wie Gasfahrzeuge, im Vergleich zu den übrigen Alternativen.

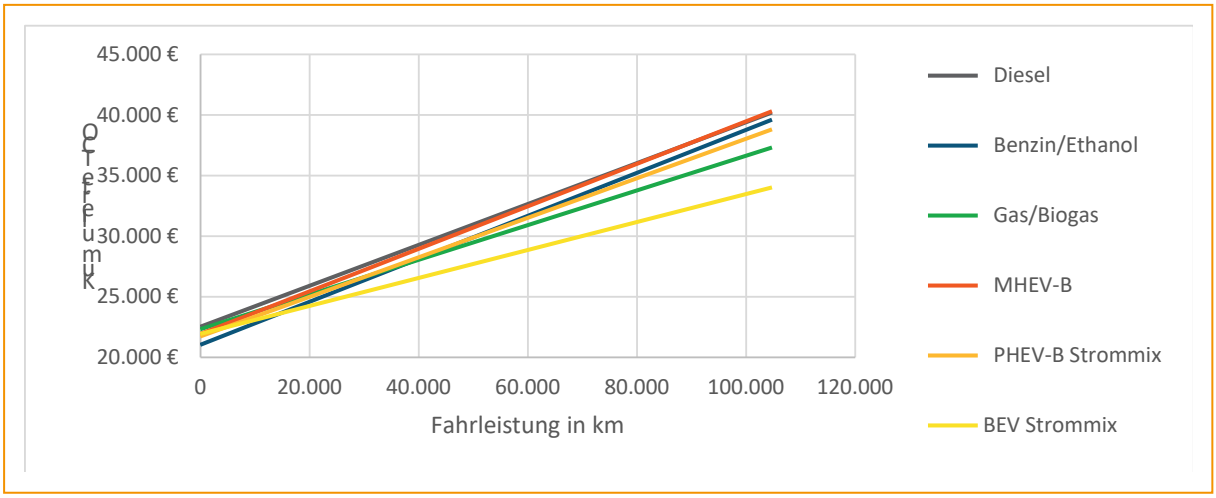


Abbildung 29 - TCO in Abhängigkeit von der Fahrleistung verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse 2020 - privat im Basisszenario (die TCO von FCEV liegen deutlich oberhalb der Alternativen und sind deshalb in dieser Abbildung nicht dargestellt). Quelle: eigene Darstellung.

Betrachtet man die fahrleistungsabhängigen TCO für eine Anschaffung im Jahr 2030, zeigt sich, dass Mildhybride Benzinfahrzeuge sowie Gasfahrzeuge zunächst die wirtschaftlichste Alternative darstellen(siehe Abbildung 30). Ab einer Fahrleistung von etwa 95.000 km ist das BEV dann wirtschaftlicher und auch PHEV werden immer wirtschaftlicher.

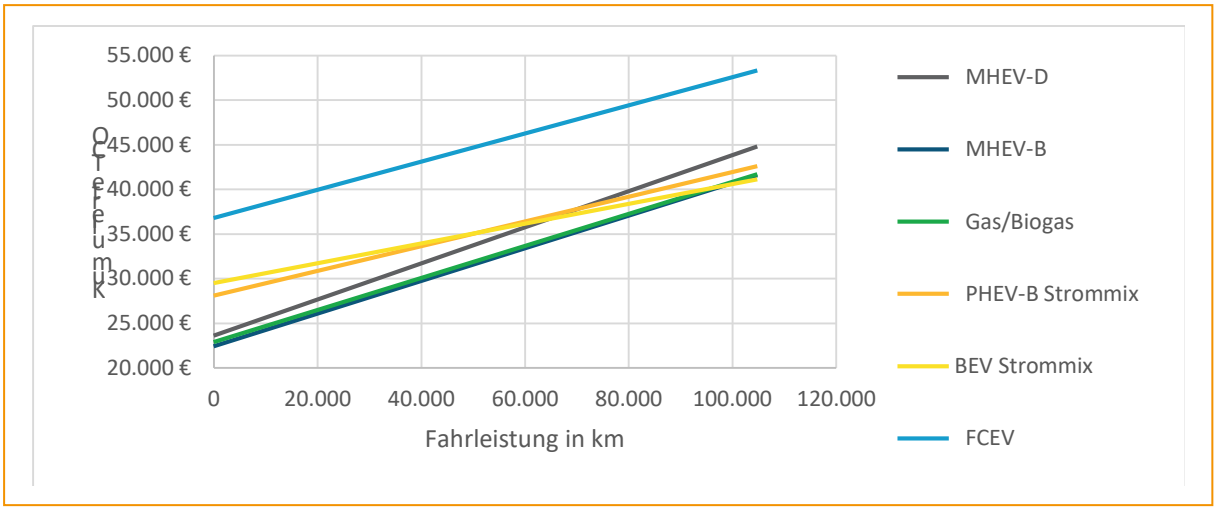


Abbildung 30 - TCO in Abhängigkeit von der Fahrleistung verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse 2030 - privat im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

SUV - privat

Abbildung 31 zeigt die TCO privater SUVs im Basisszenario. In diesem Segment stellen 2020 Gasfahrzeuge die wirtschaftlichste Alternative dar, gefolgt von den übrigen ICEVs. Trotz Kaufpreissubventionen sind EVs teurer. Dies gilt sowohl für BEVs und PHEVs als auch für FCEVs. Sehr hohe Anschaffungskosten und keine klaren Energiekostenvorteile gegenüber ICEVs führen zu dieser Situation. FCEVs stellen wieder die teuerste Alternative dar, jedoch ist der Abstand zu den Alternativen geringer als in der Kompaktklasse. Es zeigt sich

überdies, dass die deutliche Reichweiten- und damit Batteriekapazitätserhöhung in 2030 gegenüber 2020 durch eine Reduktion der Batteriekosten weitgehen ausgeglichen wird.

Die Änderungen in 2030 sind relativ gering. Da aufgrund der CO_2-Steuer ICEVs teurer werden, bei EVs nur eine geringe Kostensteigerung zu verzeichnen ist, gleichen sich die TCO insgesamt an. 2040 setzt sich der Trend der Annäherung der TCO weiter fort. ICEVs stellen jedoch nach wie vor die wirtschaftlichste Alternative dar. PHEVs und vor allem FCEVs nicht nach wie vor deutlich teurer als die Alternativen. Lediglich BEVs schließen aufgrund sinkender Batteriekosten langsam zu den ICEVs auf. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass FCEVs im SUV-Segment bis 2040 im Vergleich zur Kompaktklasse am ehesten zu den Alternativen aufschließen können.

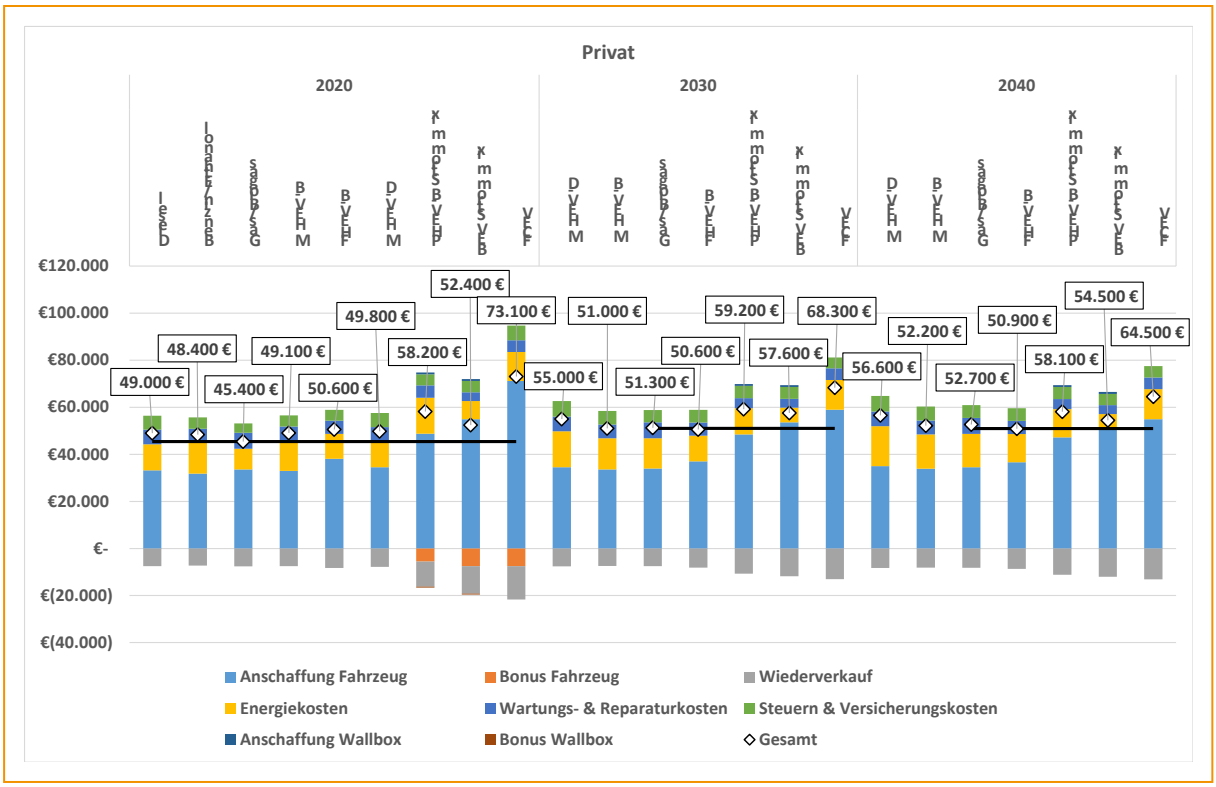


Abbildung 31 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von SUVs - privat im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

Kompaktklasse - Flotte

Das Bild der TCO bei Kompaktklasse-Pkw in Flottenanwendungen ist sehr ähnlich zur Privatnutzung (siehe Abbildung 32). BEVs sind aufgrund der Förderung am wirtschaftlichsten, gefolgt von Gasfahrzeugen und PHEVs. Offenbar gleichen sich die geringere angenommene Nutzungsdauer, welche hohen Anschaffungskosten von EVs ein höheres Gewicht verleiht und die höhere angenommene Jahresfahrleistung von Flottenanwendungen gegenüber der Privatnutzung, welche Energiekostenvorteile für EVs generieren, weitgehend aus. Hinzu kommt, dass die Strompreise im Gewerbe deutlich geringer sind, als die von Haushalten. FCEVs sind wiederum mit Abstand am teuersten. Ab 2030 sind BEVs und PHEVs, trotz eines Wegfalls der Subventionen, die günstigste Alternative. Die steigende CO_2-Steuer in Verbindung mit der höheren Jahresfahrleistung von Flottenfahrzeugen wirkt sich daher zum Nachteil von ICEVs aus. Dies wird 2040 noch deutlicher, sodass der TCO-Vorteil von BEVs und PHEVs wächst. Die TCO von FCEVs können 2040

zu MHEVs und FHEVs aufschließen, was im Wesentlichen durch die höhere Jahresfahrleistung ermöglicht wird.

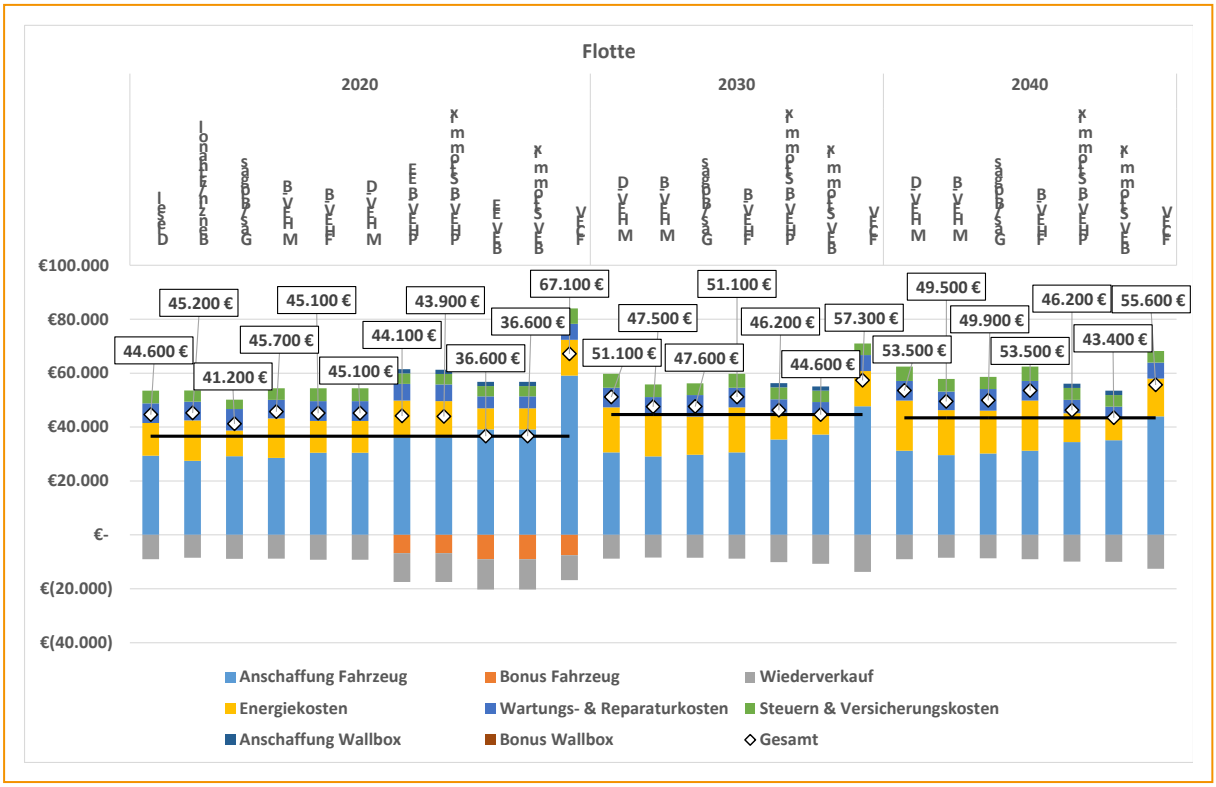


Abbildung 32 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse - Flotte im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

Kompaktklasse - Dienstwagen

Die TCO eines Dienstwagenfahrers eines Kompaktklasse-Pkws sind in Abbildung 33 dargestellt. BEVs sind aufgrund der Dienstwagenregelung in Kombination mit den Kaufpreissubventionen mit Abstand die wirtschaftlichste Alternative, da die Rolle der Anschaffungskosten durch diese beiden Effekte deutlich reduziert wird. Geringe Stromkosten bei Arbeitgeberladen sowie die höchsten Jahresfahrleistungen im Vergleich zu den anderen Nutzertypen führen zusätzlich bei BEVs zu sehr geringen Energiekosten. FCEVs sind mit PHEVs an zweiter Stelle anzusiedeln, was ebenfalls auf die Dienstwagenregelung und Subvention zurückzuführen ist. Gasfahrzeuge liegen etwas über FCEVs und PHEVs. Auf Flüssigkraftstoffen basierende ICEVs stellen 2020 keine wirtschaftliche Alternative dar.

Der angenommene Wegfall von Vergünstigungen für EVs sowohl bei der Dienstwagenregelung als auch bei den Kaufpreissubventionen für 2030 verschlechtert die Wirtschaftlichkeit von EVs sehr deutlich. BEVs gefolgt von PHEVs stellen jedoch immer noch die wirtschaftlichste Alternative mit vorteilhaften Energiekosten dar. FHEVs sind in ihren TCO mit PHEVs vergleichbar, wohingegen Mildhybride und Gasfahrzeuge wenig attraktiv sind. An diesem Bild ändert sich mit Blick auf 2040 kaum etwas.

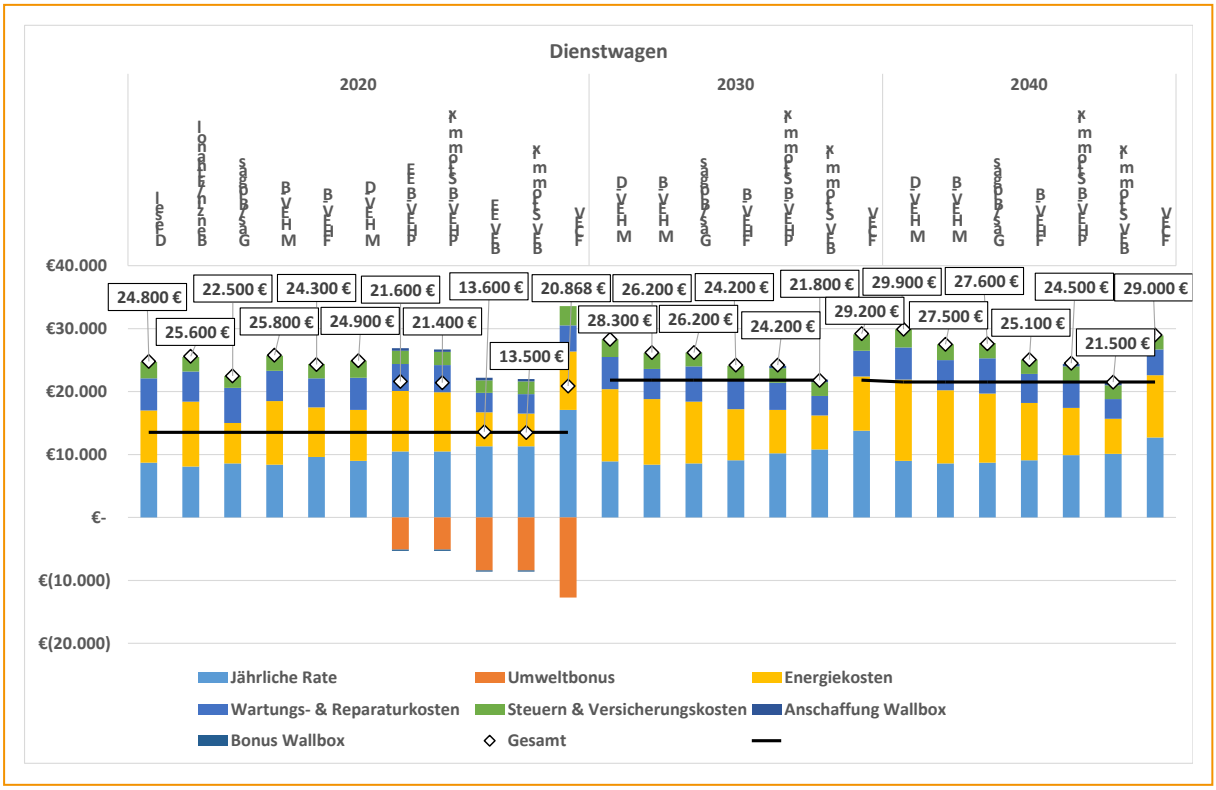


Abbildung 33 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse - Dienstwagen im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

Segmente im Vergleich - privat

Ein Vergleich über die Segmente hinweg zeigt, dass sich die wirtschaftliche Position der Alternativen generell kaum unterscheidet (siehe Abbildung 34). Zwar unterscheiden sich die Segmente in ihren absoluten TCO deutlich und SUVs stellen mit Abstand das teuerste Fahrzeugsegment dar, jedoch bleiben die relativen Differenzen der Alternativen ähnlich. Weiterhin nimmt mit steigenden absoluten TCO, die Bedeutung der Kaufpreissubventionen ab und so können durch diese im SUV-Segment 2020 keine klaren Vorteile für EVs erzielt werden. Zeigen sich BEVs ab 2030 im Kleinwagen- und Kompaktsegment auch ohne Subventionen als wirtschaftlich konkurrenzfähig, ist dies im SUV-Segment nicht der Fall.

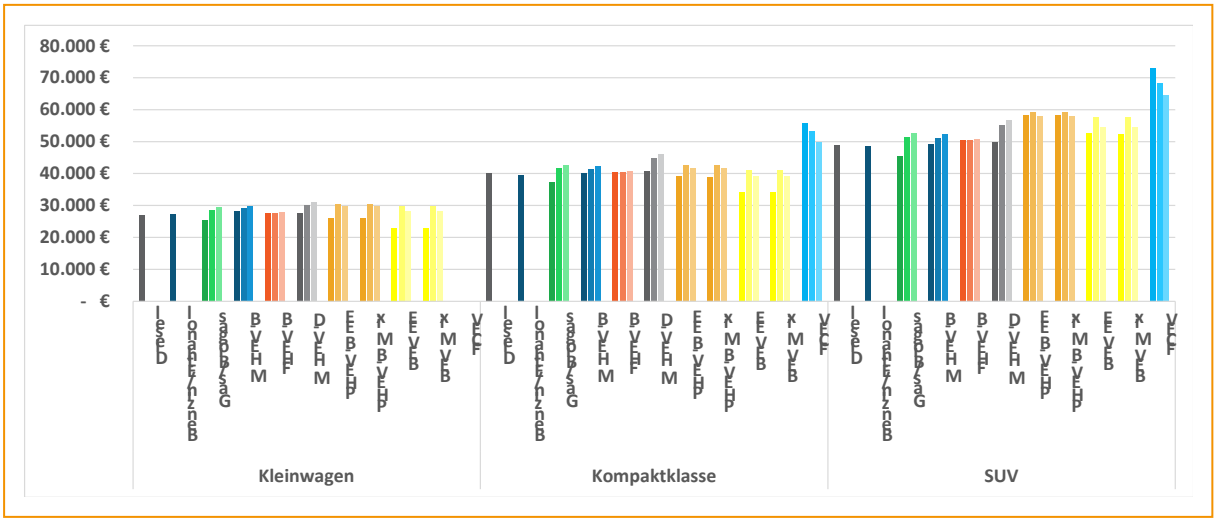


Abbildung 34 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe über die Segmente hinweg in 2020, 2030 und 2040 und in privater Nutzung im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

Zusammenfassung Basisszenario

BEVs und PHEVs stellen aktuell aufgrund der Kaufpreissubventionen und der attraktiven Dienstwagenregelung im Kleinwagen- und Kompaktklassesegment über alle Nutzertypen hinweg die wirtschaftlichste Alternative dar. Die hohen, wesentlich durch die Batterie bestimmten, Anschaffungskosten werden durch die Förderung deutlich reduziert und BEVs können ihre Vorteile geringer Energie-, Wartungs- und Reparatur- sowie Versicherungskosten und Steuern ausspielen. Ausnahme hiervon bilden SUVs. Aufgrund der hohen Masse benötigen diese eine Batterie mit hoher Kapazität, was einerseits Masse bzw. Verbrauch und andererseits die Kosten deutlich erhöht. Hier sind bei Privatnutzern Gasfahrzeuge wirtschaftlicher, welche sich durch geringere Anschaffungskosten und günstige Energiekosten auszeichnen. Gasfahrzeuge stellen aktuell generell in allen Segmenten und für alle Nutzertypen, abgesehen von subventionierten BEVs und PHEVs eine wirtschaftlich effiziente Alternative dar.

Der aktuelle Vorteil von BEVs und PHEVs wird bei Flottenfahrzeug- und Dienstwagennutzern noch deutlicher. Grund hierfür sind die im Vergleich zu Privatnutzern erhöhte Jahresfahrleistung, die den Energiekostenvorteil verstärkt sowie die günstigeren Strompreise beim Arbeitgeberladen, die die verkürzte Haltedauer mehr als kompensieren. Aufgrund der attraktiven Dienstwagenregelung stellen FCEVs hier aktuell sogar die zweitgünstigste Alternative dar.

Bei der künftigen Entwicklung im Kleinwagen- und Kompaktklassesegment ist festzuhalten, dass die TCO aller Antriebsalternativen sehr nahe beisammen liegen. Bei Kleinwagen stellen FHEV und Gasfahrzeuge die wirtschaftlichste Alternative dar, bei der Kompaktklasse sind es FHEV und BEV. Ab 2040 stellen BEVs aufgrund weiter sinkender Batteriekosten zusammen mit FHEV die wirtschaftlichste Alternative dar. Bei privat genutzten SUVs stellen in 2030 als auch in 2040 hybridisierte Antriebe, vor allem FHEVs oder auch Gasantriebe die wirtschaftlichste Alternative dar.

In der Dienstwagennutzung stellen in allen Segmenten künftig BEVs die wirtschaftlichste Alternative dar, aufgrund der bereits genannten hohen Jahresfahrleistung und geringen Stromkosten. Aber auch PHEVs sowie FHEVs sind aus wirtschaftlicher Perspektive attraktiv. Auch bei Flottenfahrzeugen in der Kompaktklasse sind BEV in 2030 und 2040 die ökonomisch effizienteste Option. Bei Kleinwagen sind in 2030

FHEV und Gasfahrzeuge noch wirtschaftlicher als BEV, in 2040 liegen BEV und Gasfahrzeuge gleichauf. Bei den SUVs zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den privaten Nutzern: der mildhybridisierte Benziner und das Gasfahrzeuge stellen hier in 2030 als auch in 2040 die wirtschaftlichsten Optionen dar.

FCEVs stellen insgesamt aufgrund der hohen Anschaffungskosten in fast allen Segmenten und bei fast allen Nutzertypen die teuerste Alternative dar. Die erst mittel- bis langfristig nennenswert sinkenden Anschaffungskosten und Wasserstoffpreise führen erst 2040 zu einer Kostenangleichung gegenüber den Alternativen. Wirtschaftlich sind FCEVs dann aber immer noch nicht.

3.1.2 Szenario 1: Batteriepreisanpassung

Im Basisszenario wird für BEV in allen Segmenten von einem hohen Anstieg der realen Reichweite auf Werte zwischen 400 und 600km ab 2030 ausgegangen. Damit verbunden steigt die installierte Batteriekapazität stark an. Diese Annahme gleicht das große Kostensenkungspotential bei Batteriesystemen teilweise aus und führt dazu, dass nur geringe Preissenkungen gegenüber dem Basisjahr 2020 erzielt werden. Zum aktuellen Zeitpunkt sind die Nutzerpräferenzen hinsichtlich geforderter Reichweite gleichzeitig sehr unsicher. Neben dem hohen Preis und der fehlenden Infrastruktur, wird die mangelnde Reichweite als wesentliches Hindernis für eine schnellere und breitere Diffusion von EVs angesehen, wie eine aktuelle Umfrage zeigt (Mobile.de 2021). Hinsichtlich der generellen Trends für Klimaschutz im Verkehr (Vermeiden, Verlagern, Verbessern) und einer weiteren Verlagerung des Personenverkehrs auf den ÖPNV (Prognos AG et al. 2020) stellt sich dennoch die Frage, ob reale Reichweiten über 400 km auf lange Sicht notwendig sind. Daher wird in dieser Szenario-Rechnung exemplarisch an den Bespielen Kompaktwagen und SUV aufgezeigt, wie sich die Ergebnisse des Basisszenarios für den Privatkauf verändern, wenn keine Veränderung der Batteriekapazität erfolgt.

Kompaktklasse - Privat

Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse für die Kompaktklasse. Die reale Reichweite 2020 liegt nun entsprechend bei 272 km. Durch Effizienzsteigerungen steigt die reale Reichweite bis 2030 auf 300 statt 500 km. Durch die geringeren Anschaffungskosten unter sonst gleichen Rahmenbedingungen werden die TCO des BEV nun kompetitiver und stellt in allen Betrachtungszeiträumen die günstigste Alternative dar, obwohl, wie in Kapitel 2.4.2 diskutiert, eine insgesamt konservative Preisdegression des BEV angenommen wird. Der Anschaffungspreis geht in diesem Szenario um etwa 12% gegenüber 2020 zurück. Für 2020 gibt es keine Veränderung der Werte. In 2030 liegt der neue Kostenvorteil über die Haltedauer bei etwa 2.500 Euro, in 2040 steigt dieser weiter an auf 3.500 bis 5.500 Euro.

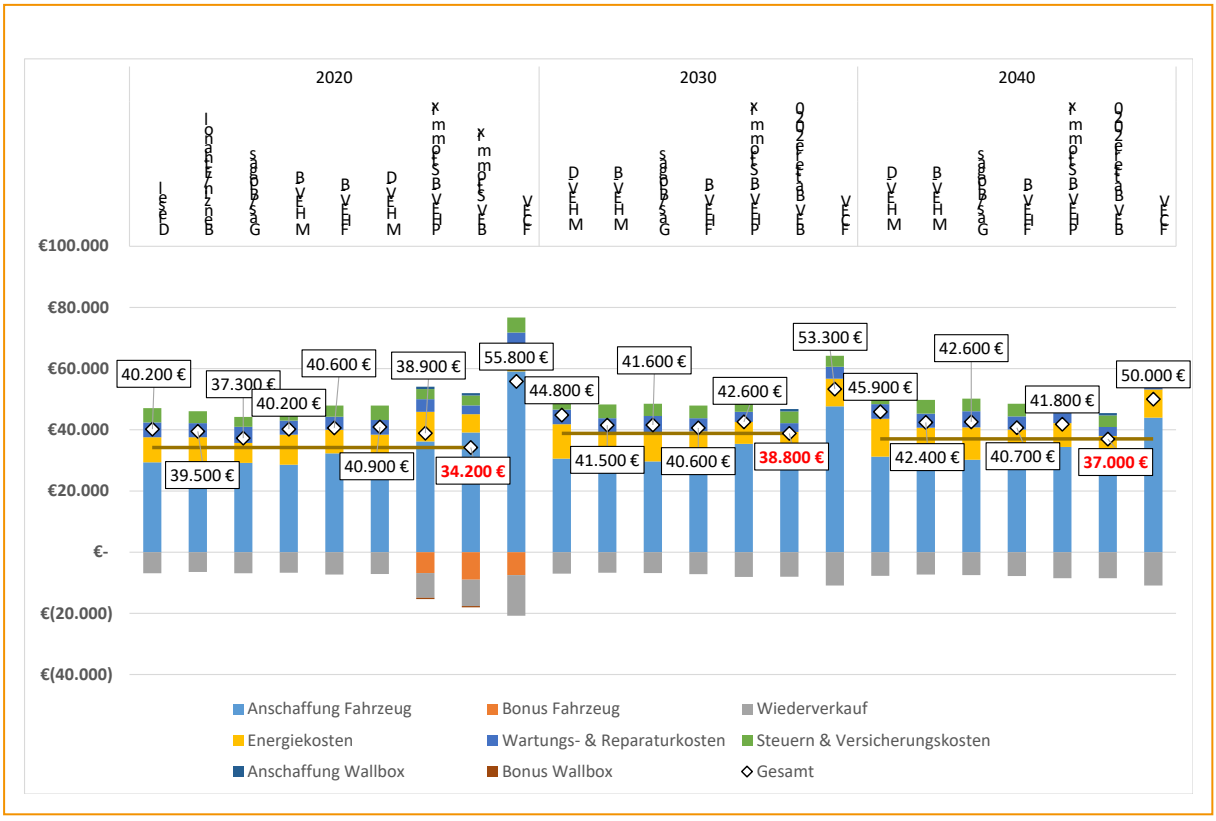


Abbildung 35 - TCO-Ergebnisse Szenario 1: Beispiel privater Kompaktwagen. Quelle: Eigene Berechnung

SUV - Privat

Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse für den SUV. Die reale Reichweite 2020 liegt nun entsprechend bei 287 km. Durch Effizienzsteigerungen steigt die reale Reichweite bis 2030 auf 320 statt 600 km. Die TCO des BEV SUV sind nun deutlich kompetitiver, da der Kaufpreis über 4.500 Euro niedriger liegt. In 2030 liegt sein Kostenniveau bereits auf einem ähnlichen Niveau wie die günstigsten Alternativen. Hier liegen Benzin- und Gasfahrzeuge mit rund 51.000 Euro gegenüber 53.800 Euro für den BEV vorne. In 2040 liegen Benziner, Gasfahrzeug und BEV zwischen 51.000 Euro und 53.000 Euro auf nahezu gleichem Niveau, wobei der Vollhybrid mit Benzin/Ethanol als Kraftstoff die ökonomischste Alternative darstellt.

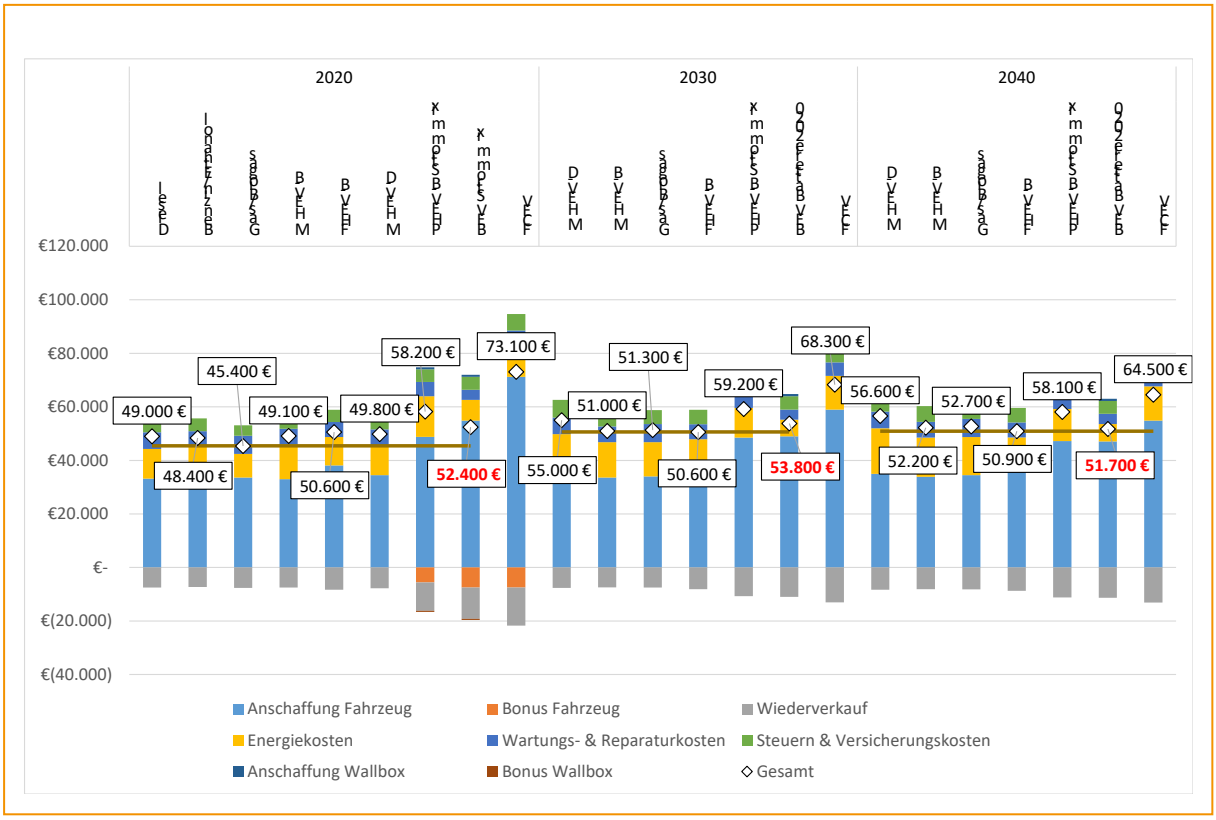


Abbildung 36 - TCO-Ergebnisse Szenario 1: Beispiel privater SUV. Quelle: Eigene Berechnung

Zusammenfassung Szenario 1

Als Zwischenfazit zeigt sich, dass ohne eine Veränderung der Batteriekapazität die verschiedenen Antriebe noch enger zusammenrücken und der BEV in seiner Wirtschaftlichkeit steigt. Wesentliche Erkenntnisse aus dem Basisszenario werden bestätigt. Bereits in 2030 kann der BEV in allen Segmenten und für alle Nutzergruppen die wirtschaftlichste Antriebsalternative darstellen. Verstärkt wird dieser Trend vor dem Hintergrund der angenommenen konservativen Gesamtkostendegression beim BEV im Vergleich zu anderen Studien (siehe Kapitel 2.4.2). Werden die in Kapitel 2.4.2 aufgeführten Kostenreduktionspotentiale von rund 20 bis 30% gegenüber den Anschaffungspreisen in 2020 für 2030 angesetzt, stellt der batterie-elektrische Antrieb vermutlich für alle Halter, über alle Segmente und in allen betrachteten Anschaffungszeitpunkten den wirtschaftlichsten Antrieb dar. Diese Hypothese liegt aufgrund der sehr engen TCO-Ergebnisse und der hohen Sensitivität gegenüber den Anschaffungskosten nahe. Im Sinne eines konsistenten Szenarios wäre diese enorme Kostenreduktion, ceteris paribus, ebenfalls mit einer konstanten Batteriekapazität zu kombinieren. Einschränkend sind hier sicherlich der Einfluss des Rahmenszenarios sowie insbesondere die hohe Förderung für BEV in 2020 zu nennen. Im Folgenden wird daher basierend auf dem Basisszenario ein weiteres Szenario ohne Umlagen und Steuern betrachtet.

3.1.3 Szenario 2: ohne Subventionen, Abgaben und Steuern

Um den Einfluss von Lenkungsabgaben und anderen regulatorischen Maßnahmen in der aktuellen Politik auszublenden, wurde ein Szenario ohne Fördermaßnahmen, Abgaben und Steuern betrachtet. Hierdurch soll ein neutraler Blick auf die technologisch bedingten Mobilitätskosten für die verschiedenen Nutzergruppen geschaffen werden. Da einerseits aktuelle Regelungen zum Anschaffungszeitpunkt 2020 aber

auch langfristige Stellhebel wie de CO_2-Abgabe entfallen, verändern sich die Ergebnisse gegenüber dem Basisszenario in allen Betrachtungszeitpunkten. Konkret bedeutet dies, dass folgende Faktoren bei der TCO-Berechnung entfallen:

- Keine Betrachtung von Mehrwert- bzw. Umsatzsteuer: Insbesondere auf den Kaufpreis des Fahrzeugs (Netto- statt Bruttolistenpreis), für die Berechnung der Endverbraucherpreise je Energieträger sowie allen weiteren Kostenkomponenten der TCO.
- Keine Kaufprämie: Keine Subventionierung bzw. Förderung ("Umweltbonus" bzw. „Innovationsprämie“) für den Kauf von neuen BEV, PHEV und FCEV für den Anschaffungszeitpunkt 2020, sowie für etwaige Ladeinfrastruktur.
- Dienstwagenregelung: Entfall der 0,25 und 0,5% Sonderregelung für BEV, PHEV und FCEV für den Anschaffungszeitpunkt 2020. Stattdessen werden alle Antriebe mit der gängigen 1%-Regelung berechnet.
- Keine CO_2-Abgabe auf konventionelle und biogene Energieträger.
- Keine Energiesteuer auf Energieträger.
- Keine Berücksichtigung der Kfz-Steuer für alle Segmente und Antriebe.
- Keine Umlagen bei Strom: keine Berücksichtigung von Umlagen auf den Strompreis wie bspw. EEG-Umlage, KWKG-Umlage, §19 StromNEV-Umlage, Offshore-Haftungsumlage, Umlagen für abschaltbare Lasten, oder die berücksichtigte Preisreduktion durch Lastflexibilität nach §14 EnWG.

Alle Energieträgerpreise enthalten nach wie vor Kostenkomponenten und Bestandteile im Zusammenhang mit der Beschaffung, dem Vertrieb, den Margen der Erzeuger und der Vertriebspartner, oder der Verteilung der Energieträger. Dabei sind einerseits Transporte nach Deutschland sowie die innerdeutsche Verteilung zu unterscheiden. Hierunter fallen insbesondere auch Netzentgelte sowie Konzessionsabgaben für gasförmige Energieträger und Strom. Auch bleiben Infrastrukturkosten in der Rechnung enthalten. Für die Berechnung der jährlichen Rate als Dienstwagennutzer (siehe Kapitel 2.2.2) bleiben alle Steuern und Versicherungsabgaben unverändert.

Kompaktklasse - Privat

Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse für den privaten Kauf eines Kompaktwagens. Im Jahr 2020 stellen die reinen und hybridisierten verbrennungsmotorischen Fahrzeuge die günstigste Alternative dar. Die hohen Anschaffungskosten der PHEV und BEV amortisieren sich nicht über die Laufzeit. Die Energieträgerkosten liegen sehr dicht beieinander und die günstigeren Wartungs- und Versicherungsprämien alleine reichen nicht aus. In 2020 liegt der Kostenvorteil für ICEV bei etwa 6.400 Euro. Der FCEV sticht auch in diesem Szenario hervor. Insbesondere sind die hohen Energiekosten aufzuführen, was wiederum an der weiterhin enthaltenen Infrastruktur-Umlage liegt. In 2030 gleichen sich die Antriebe an, und der Kostenvorteil reduziert sich auf etwa 3.500 Euro. In 2040 liegen alle Antriebe mit Ausnahme des FCEV zwischen 31.500 und 33.700 Euro, da die geringer werdenden Energiekosten die höheren Anschaffungspreise ausgleichen. Abgesehen vom FCEV sind Diesel und PHEV zusammen die am wenigsten wirtschaftliche Alternative. Die günstigste Alternative stellt der FHEV dar. BEV und Gasfahrzeug liegen bei 32.700 bzw. 32.600 Euro.

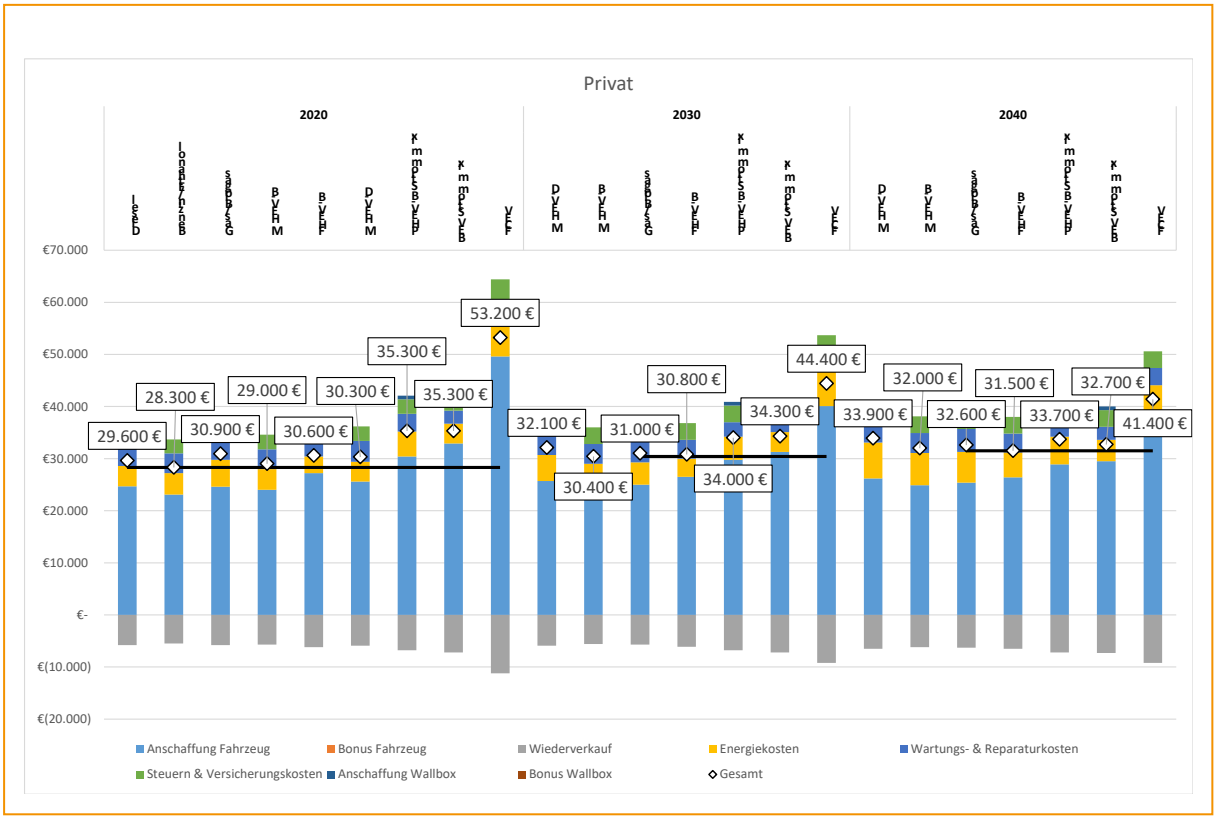


Abbildung 37 - TCO-Ergebnisse Szenario 2: Beispiel privater Kompaktwagen. Quelle: Eigene Berechnung

Kompaktklasse - Flotte

Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse für den gewerblichen Kauf eines Kompaktwagens. Im Vergleich zum privaten Kauf zeigen sich ähnliche Verhältnisse und Trends. Durch die höhere Laufleistung gleichen sich die Gesamtkosten schneller an. In 2020 und 2030 stellen Benzin- und gasbetriebene Fahrzeuge analog den günstigsten Antrieb dar. In 2040 liegen alle Antriebe auf einem ähnlichen Niveau. Der Diesel stellt zusammen mit dem FHEV den schlechtesten Antrieb dar, während MHEV-B, BEV und Gasfahrzeuge die günstigsten Alternativen darstellen.

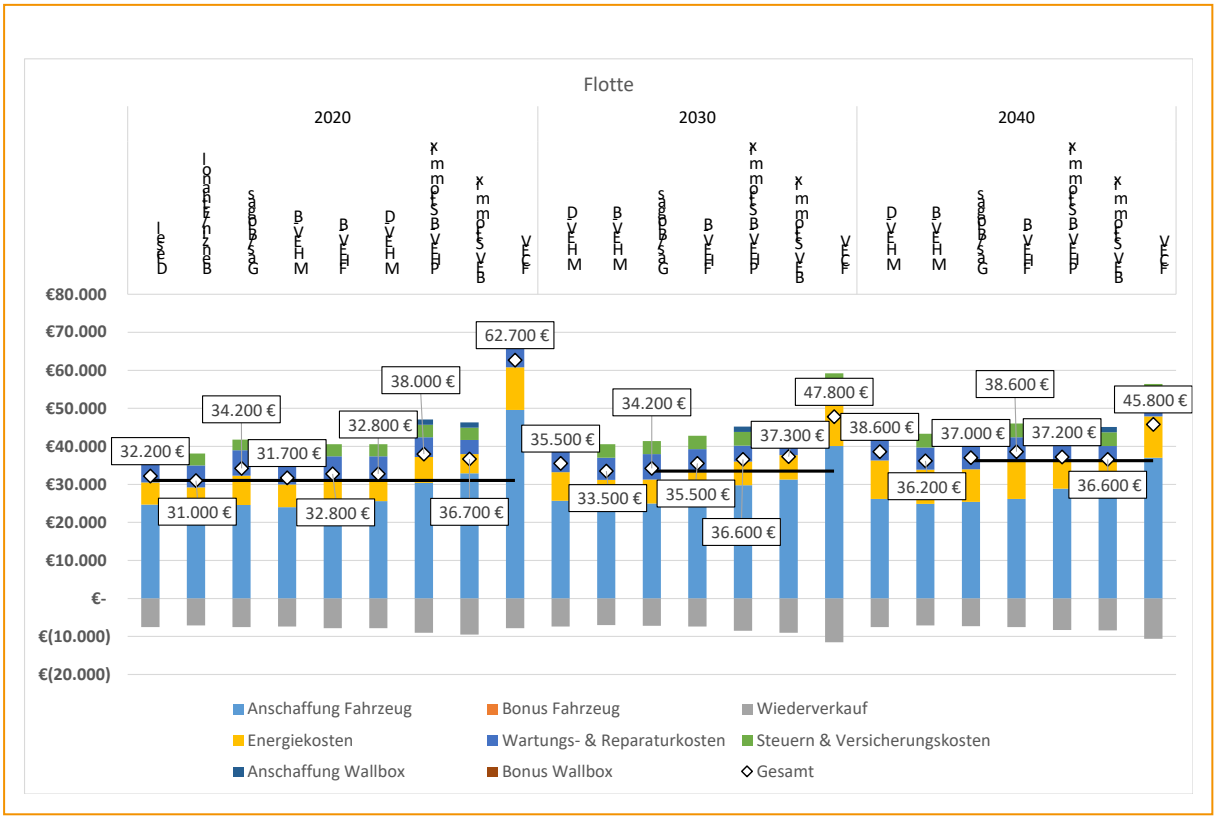


Abbildung 38 - TCO-Ergebnisse Szenario 2: Beispiel gewerblicher Kompaktwagen. Quelle: Eigene Berechnung

Kompaktklasse - Dienstwagen

Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse für den Dienstwagen. In den betrachteten Betrachtungszeitpunkten liegen alle Antriebe auf einem sehr ähnlichen Niveau. Auch ohne Subventionierung liegt der BEV bereits in 2020 mit rund 17.300 Euro gegenüber dem Benziner als günstigste Variante mit 16.800 Euro auf gleichem Niveau. Der FCEV stellt erneut die Ausnahme dar. In 2040 stellen BEV und MHEV-B mit jeweils 18.100 Euro die günstigste Alternative dar. Das Gasfahrzeug liegt bei 19.600 Euro. Auffällig sind hier die Verläufe der BEV und FHEV. Die Gesamtkosten der BEV steigen bis 2030 stark an, da die Stromkosten ansteigen und somit auch niedrigere Anschaffungskosten überkompensieren. Insbesondere sind hier der hohe Anteil öffentliches Laden und der sinkende Arbeitgeber-Ladeanteil zu nennen, wodurch die Gesamtstrompreise von etwa 21ct/kWh auf über 30ct/kWh steigen. Von 2030 auf 2040 sinken dann die Gesamtkosten durch leicht sinkende Stromkosten und niedrigere Anschaffungskosten. Beim FHEV findet dieser Kostensprung dagegen erst in 2040 mit einer höheren Beischmischung biogener und synthetischer Kraftstoffe statt.

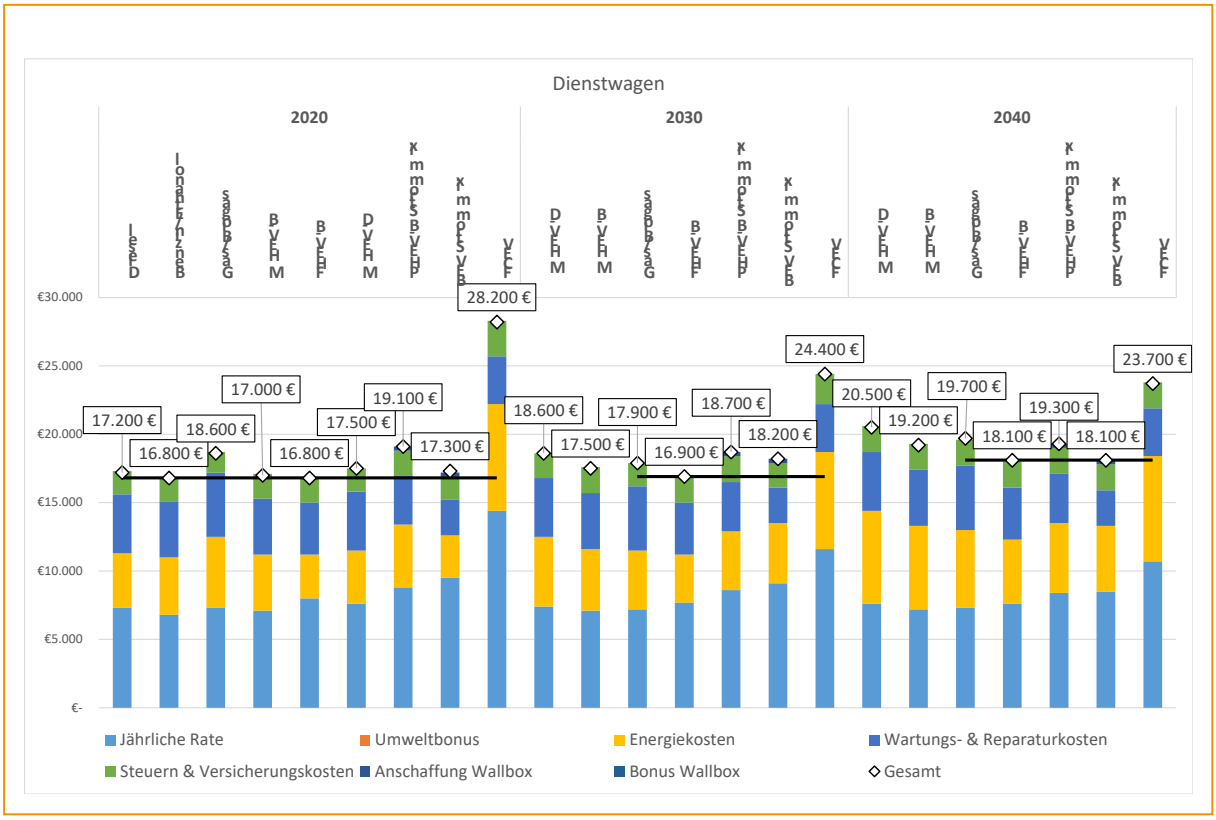


Abbildung 39 - TCO-Ergebnisse Szenario 2: Beispiel Kompaktwagen als Dienstwagen. Quelle: Eigene Berechnung

SUV - Privat

Der Kleinwagen kann, wie auch schon im Basisszenario, als analog zum Kompaktwagen betrachtet werden. Die aufgezeigten Muster für den Kompaktwagen wiederholen sich. Durch die geringere Laufleistung haben die Anschaffungskosten einen proportional höheren Einfluss und das Angleichen der Antriebe ist weniger stark ausgeprägt. Beim SUV ist dieser Einfluss entsprechend noch größer aufgrund des hohen Anschaffungspreises bei gleichzeitig geringer Kostendegression. Abbildung 40 zeigt daher die private Anschaffung eines SUV. Hier stellen Benziner und Gasfahrzeuge in allen betrachteten Zeitpunkten die wirtschaftlichste Alternative dar. In 2020 liegt der Kostenvorteil gegenüber dem PHEV bei rund 13.700 Euro und gegenüber dem BEV sogar bei 14.300 Euro. In 2040 liegt der Kostenvorteil gegenüber dem BEV noch immer bei rund 6.000 Euro. Das Angleichen der Kosten ist weniger stark ausprägt aber dennoch erkennbar. Die hybridisierten Verbrenner und das Gasfahrzeug liegen dabei in 2040 auf einem Niveau von rund 39.000 Euro.

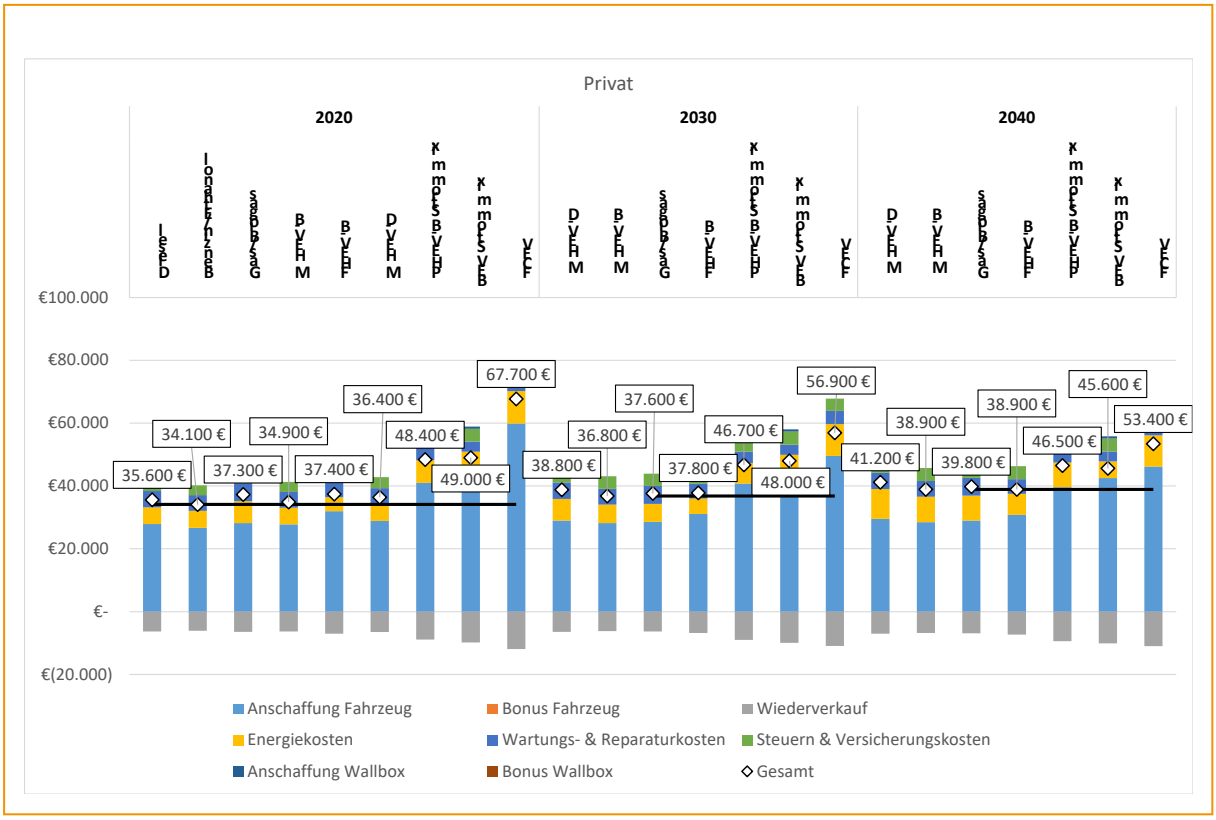


Abbildung 40 - TCO-Ergebnisse Szenario 2: Beispiel privater SUV. Quelle: Eigene Berechnung

Zusammenfassung Szenario 2

Als Fazit zeigt sich, dass ohne entsprechende Umlagen, Steuern und Abgaben der Anteil der Anschaffungskosten an den Gesamtkosten steigt. Bei den Klein- und Kompaktwagen rücken die Antriebe sehr eng zusammen. Zum Basiszeitpunkt 2020 sind die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge für den Privatkauf und den Flotteneinsatz nicht kostenkompetitiv gegenüber den anderen Antrieben. Insbesondere sind hier der Benziner und das Gasfahrzeug als wirtschaftlichste Alternativen zu nennen. Werden Anschaffung und Wiederverkauf vernachlässigt, wie beim Dienstwagenleasing, sind alle Antriebe auch weiterhin sehr eng beieinander. Dieser Umstand zeigt sich unabhängig vom Anschaffungszeitpunkt. Bereits in 2020 kann der BEV in diesem Szenario die höheren Zahlungsraten amortisieren. Insgesamt kann spätestens zum Kaufzeitpunkt 2040, also für gewerbliche und private Halter, im Rahmen der Ungenauigkeit für keine Haltegruppe ein eindeutig ökonomischster Antrieb bestimmt werden. Bei großen und schweren SUV mit hoher Reichweite ist dies Umstand nicht zu beobachten. Hier stellen Benzin- und Gasantrieb unabhängig vom Kaufzeitpunkt die wirtschaftlichsten Alternativen dar, während BEV, PHEV und FCEV auch in 2040 noch keine wirtschaftliche Option darstellen.

3.2 Ergebnisse der ökologischen Betrachtung

Neben einer Analyse des Primärenergiebedarfs sowie der Gesamtkosten über den Lebenszyklus eines Fahrzeugs werden im Folgenden die Treibhausgasemissionen verschiedener Antriebsformen, Segmente, Nutzertypen und Anschaffungsjahre aufgezeigt. Es wird dabei grundsätzlich der gesamte Lebenszyklus des Fahrzeugs betrachtet.

3.2.1 Antriebsvergleich

Abbildung 41 zeigt die Treibhausgasemissionen über die gesamte Lebensdauer eines Fahrzeuges aus der Kompaktwagenklasse in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020. Es ist grundsätzlich eine deutliche Abhängigkeit der Treibhausgasemissionen von der eingesetzten Antriebsform zu erkennen. So zeigen batterieelektrische sowie Brennstoffzellenfahrzeuge zunächst einen deutlichen größeren THG-Eintrag bei der Herstellung, was auf die verbaute Batteriekapazität sowie beim Brennstoffzellenfahrzeug auf den Energiewandler Brennstoffzelle zurückzuführen ist. Konventionelle Benzin- und Dieselfahrzuge sowie Gasfahrzeuge weisen einen vergleichbaren Fußabdruck in der Herstellung auf, wobei der Drucktank im Gasfahrzeuge etwas höhere Treibhausgasemissionen begründet. Der Plug-In-Hybrid liegt in der Herstellung etwas über den konventionellen Fahrzeugen, was wiederum auf die Batterie zurückzuführen ist, welche jedoch kleiner ausfällt als bei den rein elektrischen Fahrzeugen. Im weiteren Verlauf zeigt sich dann, dass die konventionellen Fahrzeuge insbesondere durch den hohen Emissionsfaktor fossiler Kraftstoffe sowie den vergleichsweise geringen Wirkungsgrad des Antriebs deutlich höhere Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase aufweisen als batterieelektrische Antriebe. Diese profitieren von ihrem hohen Antriebswirkungsgrad. Gasfahrzeuge stellen neben den batterieelektrischen Fahrzeugen eine sinnvolle ökologische Alternative dar. Dieser Antrieb profitiert von einem vergleichsweise geringen Emissionsfaktor des mit hohem biogenen Anteil versehenen Kraftstoffs. Brennstoffzellenfahrzeuge weisen auf Grund des hohen Emissionsfaktors der Wasserstoffherstellung aus Dampfreformierung hohe Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase auf und liegen über der Lebensdauer etwa auf einem Niveau mit konventionellen Dieselantrieben. Plug-In-Hybride können den Effekt des vergleichsweise hohen Emissionsfaktors fossiler Kraftstoffe etwas abschwächen, da sie teilweise von außen zugeführte elektrische Energie für den Vortrieb nutzen können. Der große CO_2-Fußabdruck in der Herstellung batterieelektrischer Fahrzeuge wird durch die geringen Emissionen in der Nutzungsphase nach etwa 45.000 km im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug mit Diesel- oder Benzinantrieb kompensiert. Ein Vergleich mit einem gasangetriebenen Fahrzeug zeigt jedoch, dass dieser Schnittpunkt deutlich später im Lebenszyklus des Fahrzeugs bei etwa 90.000 km liegt. Für Halter mit geringeren Laufleistungen während der Haltedauer, stellt das Gasfahrzeug demnach die ökologischste Option dar.

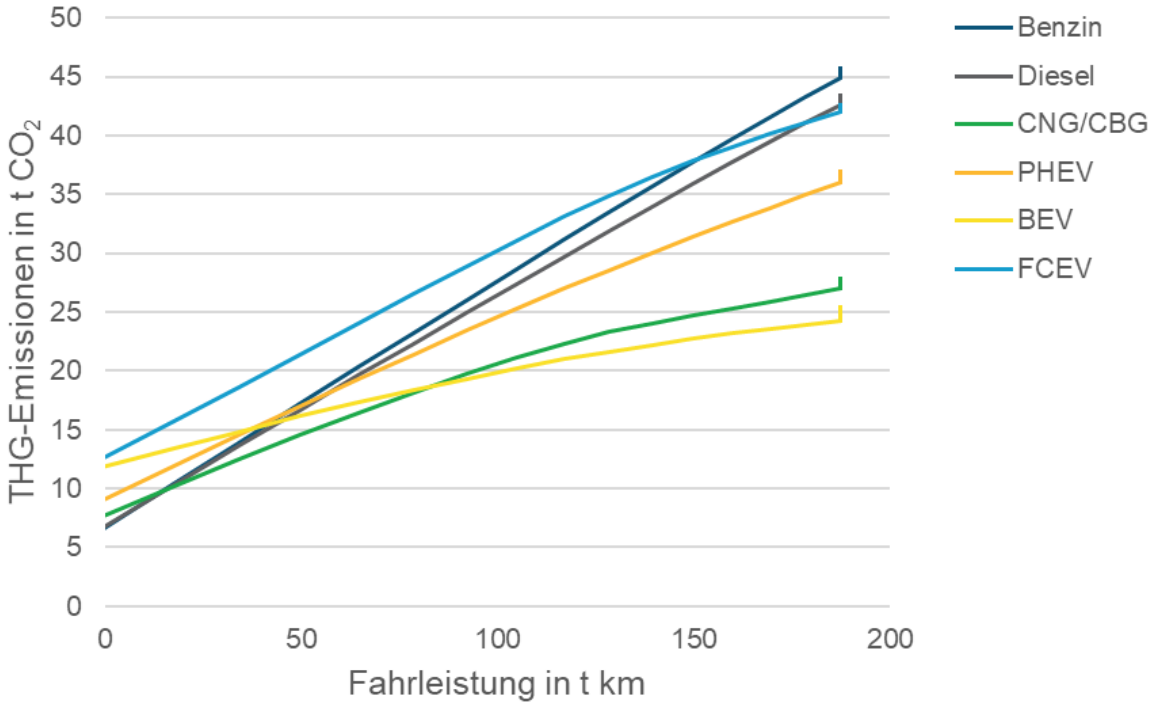


Abbildung 41 - CO_2-Emissionen verschiedener Antriebe für einen Kompaktwagen und private Nutzer für das Anschaffungsjahr 2020

Abbildung 42 zeigt die kumulierten THG-Emissionen verschiedener Fahrzeugantriebe und -segmente für den privaten Nutzer und das Anschaffungsjahr 2020. Es sind darin die relativen, auf die THG-Emissionen des Benzin-Kleinwagens bezogenen sowie die relativen Unterschiede in den untersuchten Fahrzeugklassen aufgezeigt. Es ist zunächst der eindeutige Zusammenhang der Fahrzeuggröße und -masse auf die kumulierten THG-Emissionen zu verzeichnen. Mit steigender Fahrzeuggröße steigen die THG-Emissionen in allen Lebensabschnitten des Produkts. Insbesondere der höhere Eintrag von THG-Emissionen in der Nutzungsphase führt zu signifikanten Anstiegen dieser mit steigender Fahrzeuggröße. So liegen beispielsweise die THG-Emissionen eines SUVs mit konventionellem Benzinantrieb mehr als 50 % über denen des entsprechenden Fahrzeuges aus dem Kleinwagensegment. Es lässt sich zudem feststellen, dass selbst der THG-ärmste Antrieb der SUV-Klasse (BEV) ein vergleichbares Niveau in den THG-Emissionen zeigt, wie das Fahrzeug in der Kleinwagenklasse mit der zweithöchsten THG-Emissionen, welche durch den konventionellen Dieselantrieb dargestellt wird. Weiterhin lässt sich festhalten, dass gasbetriebene Fahrzeuge in allen drei Klassen ein hohes Potential zur THG-Reduktion im Vergleich zum konventionellen Benzinantrieb bieten. In der Kleinwagen wird hier eine Reduktion der THG-Emissionen von 42 % berechnet, während für die Kompaktklasse und SUVs eine Reduktion von 39 % ermittelt wird. Die Erklärung für diesen Effekt liegt in einem vergleichsweise hohen biogenen Anteil im Erdgas von 16 % (siehe Kapitel 2.3.3). Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb weisen ebenfalls ein hohes Potential zur THG-Reduktion auf und liegen bei den untersuchten Fahrzeugklassen auf dem Niveau der mit Gas angetriebenen Fahrzeuge. Mit steigender Größe des Fahrzeugs steigt hier auch der Vorteil des BEV gegenüber dem Gasfahrzeug.

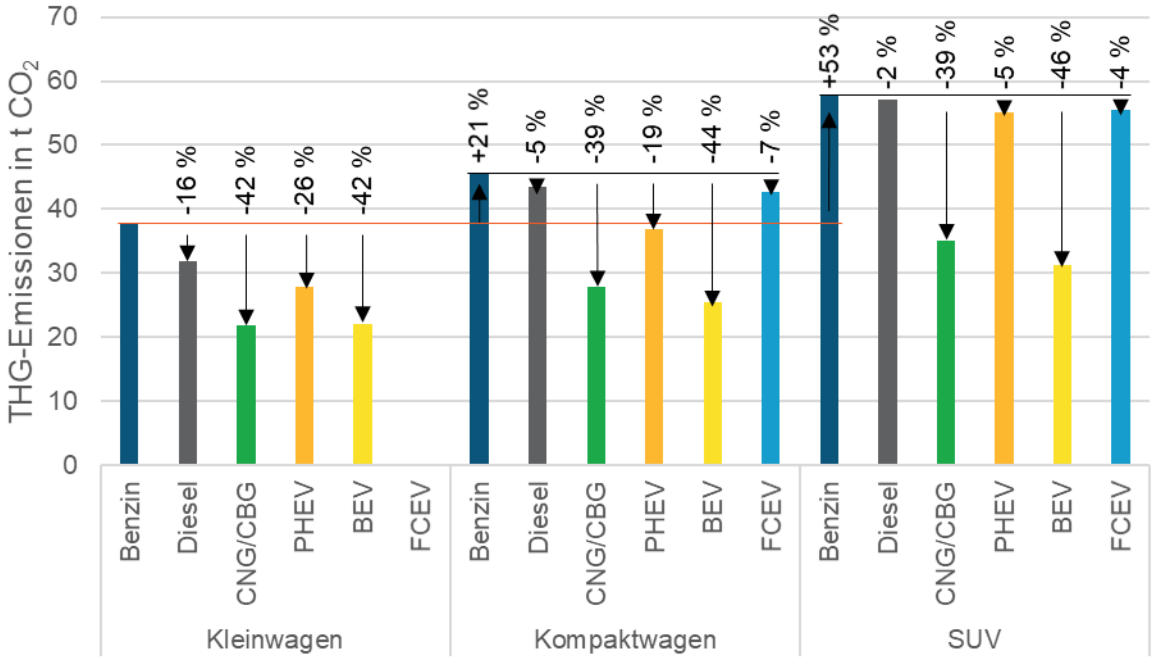


Abbildung 42 - Kumulierte THG-Emissionen für verschiedene Fahrzeugantriebe und -segmente für einen privaten Nutzer und das Anschaffungsjahr 2020

Plug-In-Hybride weisen auf Grund der Nutzung extern zugeführter elektrischer Energie, umfangreicher Wirkungsgradsteigerungen am Verbrennungsmotor durch Hybridfunktionen sowie der Bremsenergierückgewinnung ebenfalls ein deutliches Potential zur THG-Minimierung auf. In der Kleinwagenklasse wird für diesen Antriebstyp eine Minderung der THG-Emissionen von 26 % ausgewiesen. In der Kompaktwagenklasse liegt dieser Wert bei 19 %. In dem Segment der großen SUVs kann dieser Antrieb nur noch einen geringen Beitrag zu Minimierung der THG-Emissionen beitragen. Dieses Verhalten lässt vor allem auf sehr hohe Fahrzeugmassen und relativ geringe Batteriekapazitäten zurückführen. Durch diese wird die Möglichkeit des rein elektrischen Fahrens deutlich eingeschränkt, sodass dieser bzgl. der THG-Emissionen sehr positive Effekt, welcher in der Klein- und Kompaktwagenklasse genutzt wird, wenig zur THG-Bilanz beitragen kann. Die hohe Fahrzeugmasse führt bei diesen Fahrzeugen zu hohen THG-Emissionen in der Nutzungsphase. Brennstoffzellen-Fahrzeuge weisen mit sieben Prozent in der Kompaktwagenklasse und vier Prozent in der SUV-Klasse ein zu konventionellen Dieselfahrzeugen vergleichbares Niveau in den THG-Emissionen auf. Liegt die Erklärung dieser Sachverhalte bei den Brennstoffzellenfahrzeugen in der CO_2-intensiven Herstellung des Fahrzeugs sowie des Energieträgers (siehe Kapitel 2.5.1), so lässt sich das THG-Niveau der Dieselfahrzeuge mit Bezug auf den konventionellen Benzinantrieb durch einen höheren verbrennungsmotorischen Wirkungsgrad von Dieselmotoren erklären (siehe Kapitel 2.3.1).

3.2.2 Vergleich ausgewählter Fahrzeugantriebe für verschiedene Anschaffungsjahre

Die zuvor gezeigten Ergebnisse zeigen bereits die Tendenz, dass sich das Emissionsverhalten der Antriebe über die betrachtete Zeit angleichen werden. Im Folgenden werden die Antriebe Benzin, Plug-In-Hybrid sowie BEV für verschiedene Anschaffungszeitpunkte miteinander verglichen, um eben diese Tendenzen einer detaillierten Analyse zu unterziehen.

Abbildung 43 zeigt die THG-Emissionen ausgewählter Antriebe in der Kompaktwagenklasse und privatem Nutzer für verschiedene Anschaffungsjahre über den gesamten Lebenszyklus. Es lässt sich erkennen, dass batterieelektrische Fahrzeuge den größten CO_2-Eintrag bei der Herstellung aufweisen. Die CO_2-Emissionen bei der Herstellung sinken mit einer Variation des Anschaffungsjahres nur geringfügig ab. Insgesamt lässt sich eine Reduzierung der THG-Emissionen für alle Antriebsformen mit Variation des Anschaffungsjahres feststellen. Dieses Verhalten ist auf eine zunehmende Dekarbonisierung sowohl der Stromherstellung als auch der flüssigen Kraftstoffe durch Beimischung biogener und synthetischer Kraftstoffanteile zurückführen.

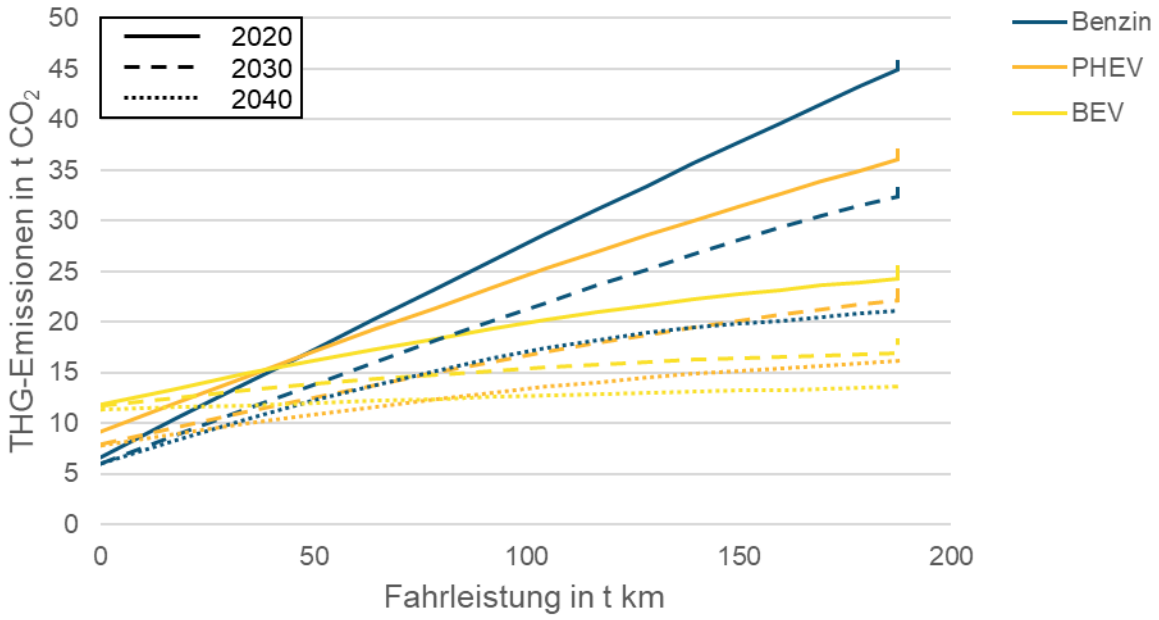


Abbildung 43 - THG-Emissionen ausgewählter Antriebe für verschiedene Anschaffungsjahre in der Kompaktwagenklasse und privatem Nutzer

Es zeigt sich außerdem, dass der konventionelle, benzinangetriebene Fahrzeugtyp auch mit Variation des Anschaffungsjahres im Vergleich zu den beiden anderen, hierbetrachteten Antrieben die größten THG-Emissionen aufweist. Plug-In-Hybride bilden eine „Zwischenlösung“ und weisen geringere THG-Emissionen auf, als das Fahrzeug mit konventionellem Antrieb, jedoch größere als das rein elektrische Fahrzeug. Auch dieses Verhalten ist auf den Kraftstoff zurückzuführen. Benzin-Kraftstoff weist auch 2030 und 2040 noch fossile Bestandteile auf. Außerdem entsteht auch bei der Herstellung und Verteilung biogener und synthetischer Kraftstoffbestandteile Kohlendioxid. Diese beiden Sachverhalte führen zu einem im Vergleich zu Strom höheren Emissionsfaktor. Ein Vergleich der Kurven für die Jahre 2020, 2030 und 2040 zeigt außerdem, dass die Unterschiede in den THG-Emissionen für die verschiedenen, hier betrachteten Fahrzeugantriebe mit der Zeit kleiner werden. Liegt der Unterschied zwischen BEV und Benzin-Fahrzeugen noch bei über 20 Tonnen CO_2, so liegt dieser für das Anschaffungsjahr 2040 nur noch bei acht Tonnen. Weiterhin lässt sich erkennen, dass der vergleichsweise hohe CO_2-Eintrag bei der Herstellung batterieelektrischer Fahrzeuge für das Anschaffungsjahr 2020 bereits nach etwa 40.000 km durch den geringeren Emissionsfaktor von Strom in der Nutzungsphase ausgeglichen wird. Eine Analyse für das Anschaffungsjahr 2040 zeigt, dass durch die Angleichung des Emissionsfaktors flüssigen Kraftstoffs an den des Stroms diesen Schnittpunkt an einen „späteren“ Zeitpunkt im Lebenszyklus verschiebt und dann bei etwa 50.000 km liegt.

Abbildung 44 zeigt die kumulierten THG-Emissionen ausgewählter Antriebe für ein Fahrzeug der Kompaktwagenklasse in privater Nutzung für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040. Es sind darin die relativen Unterschiede zwischen den Antrieben sowie für die betrachteten Anschaffungsjahre aufgezeigt. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die THG-Emissionen mit zunehmender Zeit für alle Antriebe deutlich sinken. Bei dem Fahrzeug mit dem konventionellen Antrieb ist im Jahr 2030 mit einer Reduktion der THG-Emissionen um 27 % zu rechnen. Dieser Effekt ist auf einen steigenden Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors (siehe Kapitel 2.3.1) sowie eine Beimischung CO_2-neutraler biogener und synthetischer Kraftstoffe zurückzuführen. Für das Jahr 2040 wird eine weitere signifikante Reduzierung der THG-Emissionen prognostiziert. Hier wird kein weiterer Anstieg des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades mehr angenommen. Die Reduktion der CO_2-Emissionen ist allein auf hohe Beimischquoten biogener und vor allem synthetischer Kraftstoffanteile zurückzuführen.

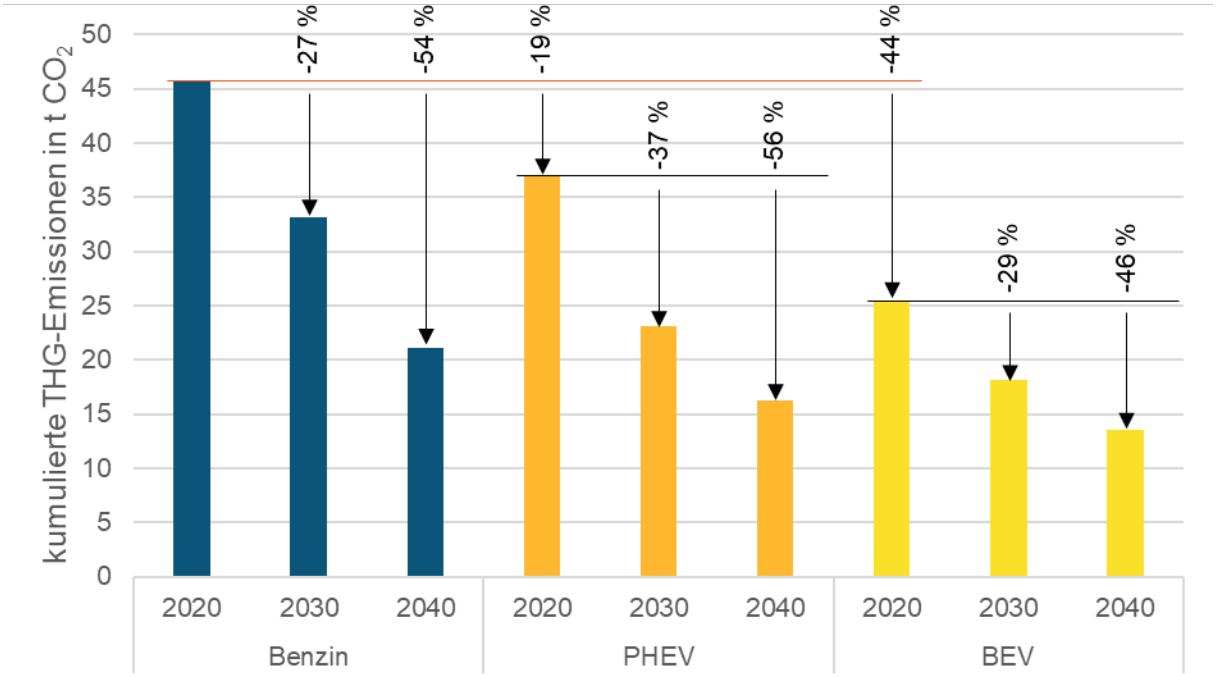


Abbildung 44 - Kumulierte THG-Emissionen ausgewählter Antriebe für ein Fahrzeug der Kompaktwagenklasse und privater Nutzung für verschiedene Anschaffungsjahre

Die Dekarbonisierung der Stromerzeugung, wie sie in Kapitel 2.3.3 erläutert wurde, führt auch bei dem batterieelektrischen Fahrzeug zu einer deutlichen Reduzierung der THG-Emissionen. Für das Anschaffungsjahr 2030 wird eine Reduktion der THG-Emissionen von 29 % im Vergleich zu 2020 ermittelt. Dies ist auf die zuvor genannte Dekarbonisierung der Stromerzeugung sowie einen Wirkungsgradzuwachs des Antriebs zurückzuführen. Für das Jahr 2030 muss zudem beachtet werden, dass auf Grund der größeren Batteriekapazität, die zur Erreichung hoher elektrischer Reichweiten installiert wird, ein Anstieg der THG-Emissionen bei der Fahrzeugherstellung zu erwarten ist, welche die Gesamtbilanz anhebt. Für das Anschaffungsjahr 2040 wird eine weitere Senkung der THG-Emissionen prognostiziert, sodass eine Minderung von 46 % im Vergleich zu 2020 eintritt. Die zusätzliche Reduktion im Vergleich zu 2030 ist dann ausschließlich durch die Dekarbonisierung der Stromerzeugung zu erklären. Bei den Plug-In-Hybriden wird eine im Vergleich zum konventionellen Antrieb geringere Reduktion der CO_2-Emissionen für das Jahr 2030

berechnet. Im Gegensatz zum konventionellen Antrieb wird hier eine deutliche Zunahme der Batteriekapazität erwartet, welche sich in der Herstellung auf den CO_2-Eintrag auswirkt und damit die THG-Emissionsreduzierung etwas drückt. Nach 2030 wird weder für den elektrischen noch für den verbrennungsmotorischen Pfad ein Wirkungsgradzuwachs erwartet. Zudem wird auch die Batteriekapazität nicht weiter erhöht. Die entstehende Reduktion der THG-Emissionen für das Anschaffungsjahr 2040 ist damit ausschließlich auf die Dekarbonisierung der Energieträger zurückzuführen.

3.2.3 Vergleich der THG-Emissionen in Abhängigkeit der Hybridisierung

In Kapitel 2.3.1 wurde dargelegt, wie sich eine mehr oder weniger starke Hybridisierung auf den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeuges auswirkt. Im Folgenden soll die CO_2-Gesamtbilanz eines Fahrzeuges mit verschiedenen Hybridisierungsgraden aufgezeigt werden.

Abbildung 45 stellt die THG-Emissionen eines Fahrzeuges aus der Kompaktwagenklasse für einen privaten Nutzer und verschiedene Benzin-Hybridisierungen für das Anschaffungsjahr 2020 dar. Es ist zu beobachten, dass Plug-In-Hybride den größten CO_2-Eintrag bei der Herstellung aufweisen.

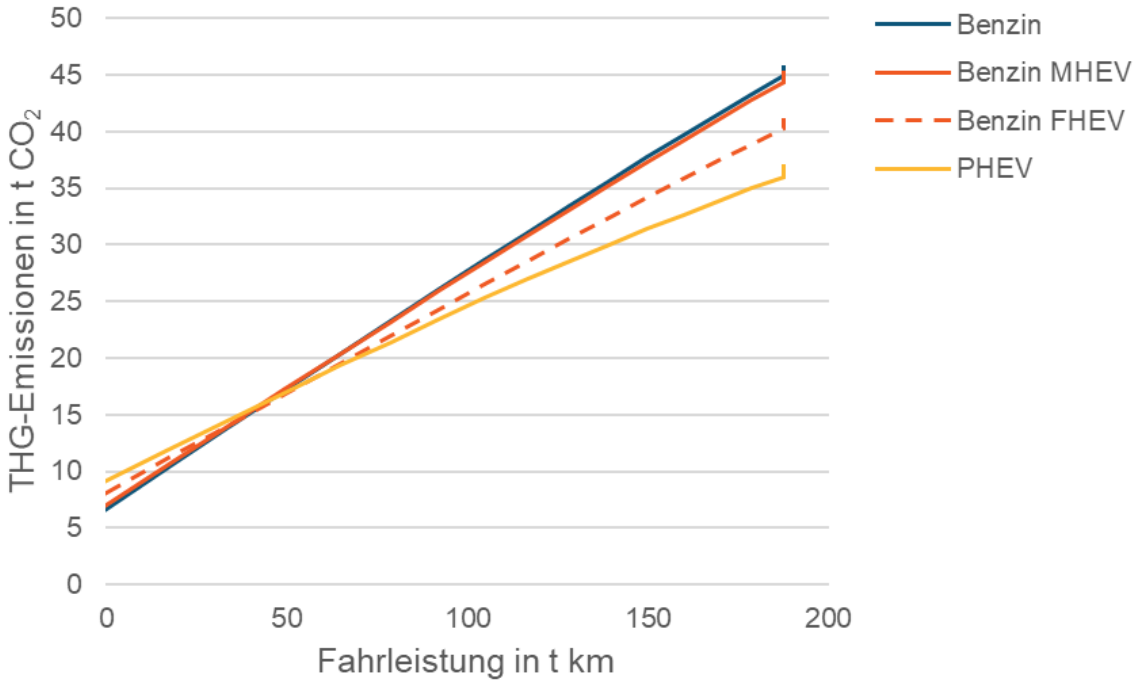


Abbildung 45 - THG-Emissionen eines Kompaktwagens mit verschiedenen Hybridisierungsgraden in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020

Dies ist auf die verbaute Traktionsbatterie zurückzuführen, welche im Vergleich zum Full- und Mild-Hybrid eine größere Kapazität aufweist. Das nicht-elektrifizierte Fahrzeug weist hier den geringsten CO_2-Eintrag auf, da es keine Batterie beinhaltet. Über den gesamten Lebenszyklus betrachtet zeigt sich, dass das Plug-In-Hybrid-Fahrzeug die geringsten THG-Emissionen und das Full-Hybrid-Fahrzeug ebenfalls eine signifikante CO_2-Reduzierung im Gegensatz zu dem konventionellen Antrieb aufweist. Der Mild-Hybrid-Antrieb sowie das rein konventionell angetriebene Fahrzeug weisen nahezu dieselben THG-Emissionen auf. Die verringerten CO_2-Emissionen des Plug-In-Hybrids lassen sich zum einen auf die Nutzung extern zugeführten Stroms über den

Netzstecker, zum anderen auf eine Anhebung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades durch Hybridfunktionen sowie Bremsenergierückgewinnung zurückführen. Der Full-Hybrid weist ein geringeres CO_2-Potential auf, da dieser Antrieb keine elektrische Energie für elektrisches Fahren nutzen kann, sondern lediglich eine Betriebspunktverschiebung sowie Hybridfunktionen wie Rekuperation nutzen kann. Der Mild-Hybrid weist lediglich begrenztes Potential zur CO_2-Reduktion auf, da nur kleine elektrische Leistungen zur Verfügung stehen und damit beispielsweise eine effektive Lastpunktverschiebung des Verbrennungsmotors, Bremsenergierekuperation oder rein elektrisches Fahren nur sehr begrenzt oder gar nicht möglich sind.

Abbildung 46 zeigt die kumulierten THG-Emissionen eines Fahrzeuges der Kompaktwagenklasse eines privaten Nutzers für das Anschaffungsjahr 2020 und verschieden starke Hybridisierungen. In der Abbildung sind die relativen Unterschiede der THG-Emissionen der verschiedenen Hybridisierungen relativ zum konventionellen Antrieb aufgezeigt. Die Analyse zeigt, dass eine Mild-Hybridisierung nur geringen Einfluss auf die THG-Emissionen des Fahrzeuges aufweist. Dies lässt sich auf die beschränkten Hybridfunktionen dieser Technologie zurückführen. Eine Full-Hybridisierung bewirkt eine zehn prozentige Reduzierung der THG-Emissionen im Vergleich zum konventionellen Antrieb. Auf Grund der Hybridfunktionen, welche bei einem Full-Hybrid zur Verfügung stehen, kann der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors deutlich angehoben werden. Zudem ist das Potential der Bremsenergierekuperation deutlich größer, als es bei einem Mild-Hybrid der Fall ist. Die Möglichkeit, kurze Strecken und geringe Fahrzeuggeschwindigkeiten elektrisch abzubilden, führen hier zu einem deutlichen THG-Vorteil. Die Nutzung extern zugeführter elektrischer Energie führt bei einem Plug-In-Hybrid zusätzlich zu den zuvor diskutierten Hybrid-Funktionen zu einer weiteren Reduzierung der THG-Emissionen von 19 % im Gegensatz zu einem Fahrzeug mit konventionellem Benzinantrieb.

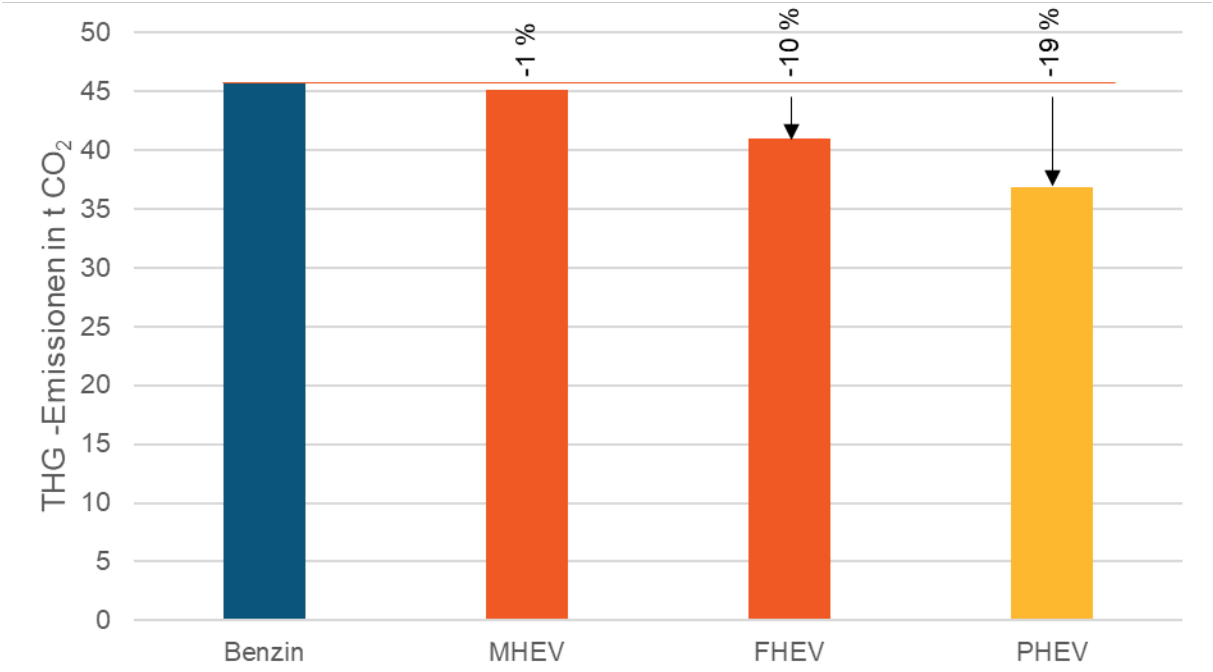


Abbildung 46 - Kumulierte THG-Emissionen eines Fahrzeuges der Kompaktwagenklasse in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020 und verschiedene Hybridisierungsgrade

3.2.4 Vergleich Nutzertypen

Abbildung 47 zeigt die THG-Emissionen ausgewählter Fahrzeugantriebe für die Kompaktwagenklasse für verschiedene Nutzertypen für das Anschaffungsjahr 2020. Grundsätzlich lässt sich erkennen, dass alle drei Nutzerklassen unterschiedlich hohe Fahrleistungen aufzeigen (siehe Kapitel 2.3.2). Es lässt sich zudem feststellen, dass durch die unterschiedlichen Jahresfahrleistungen die THG-Emissionen nutzerabhängig verschiedene Verläufe aufweisen. Dieses Verhalten lässt sich auf die mit der Zeit verändernden Emissionsfaktoren der Energieträger auf Grund der zunehmenden Dekarbonisierung des Strommixes sowie steigender Beimischquoten biogener und synthetischer Kraftstoffanteile zurückzuführen. Auf Grund der geringeren Jahresfahrleistung der privaten Nutzergruppe, profitiert diese Gruppe eben von den sinkenden Emissionsfaktoren der Energieträger über der Zeit. Die Nutzergruppen mit hohen Jahresfahrleistungen hingegen nutzen vermehrt CO_2-intensive Energieträger zu Beginn ihres Lebenszyklus und stoßen damit in Summe eine größere CO_2-Menge aus.

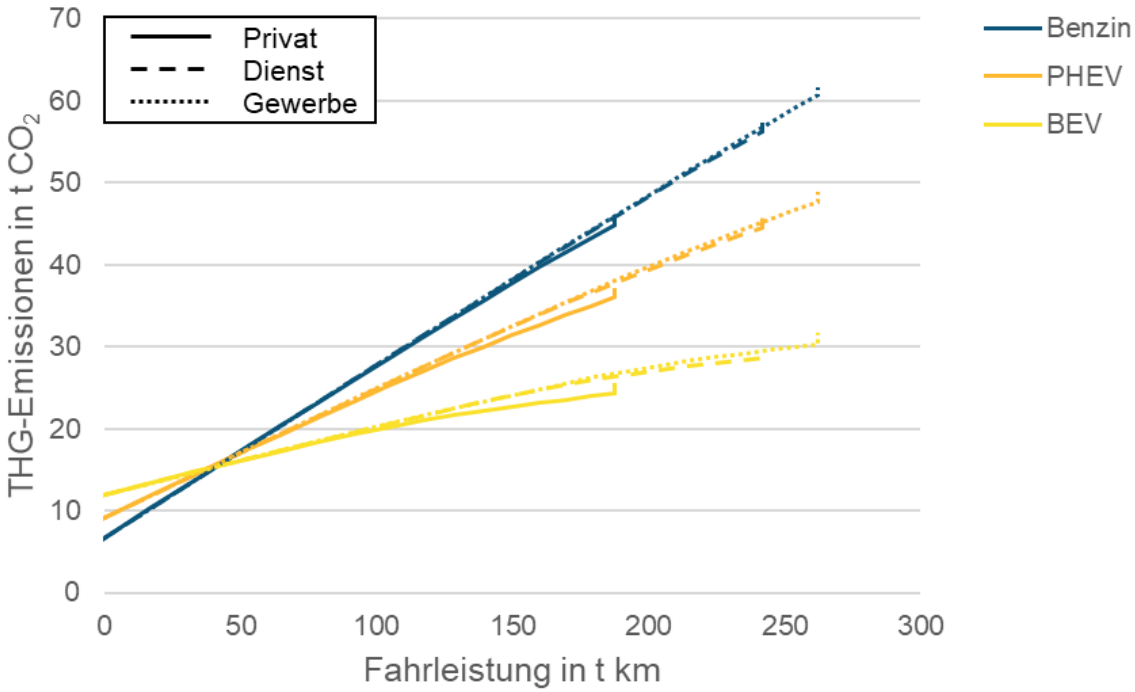


Abbildung 47 - THG-Emissionen ausgewählter Antriebe eines Kompaktwagens für verschiedene Nutzertypen und das Anschaffungsjahr 2020

Abbildung 48 stellt die THG-Emissionen ausgewählter Antriebe für ein Fahrzeug der Kompaktwagenklasse für das Anschaffungsjahr 2020 und verschiedene Nutzerklassen dar. Es ist darin der relative Unterschied der THG-Emissionen zwischen den verschiedenen Nutzertypen sowie für die verschiedenen Antriebe aufgezeigt. Auf die Unterschiede der THG-Emissionen zwischen den verschiedenen Antrieben wurde in Kapitel 3.3.1 bereits ausführlich eingegangen. Grundsätzlich ist ein Anstieg der THG-Emissionen für die Nutzerklassen zu erkennen. Auf Grund der höheren Laufleistung des Dienstwagennutzers im Vergleich zum privaten Nutzer steigen die kumulierten THG-Emissionen für einen konventionellen Benzinantrieb um 25 % an. Für ein gewerblich

genutztes Fahrzeug ist gar ein Anstieg von 34 % im Vergleich zum Privatnutzer zu erkennen, was ebenfalls auf eine größere Gesamtlaufleistung in dieser Nutzerklasse zurückzuführen ist.

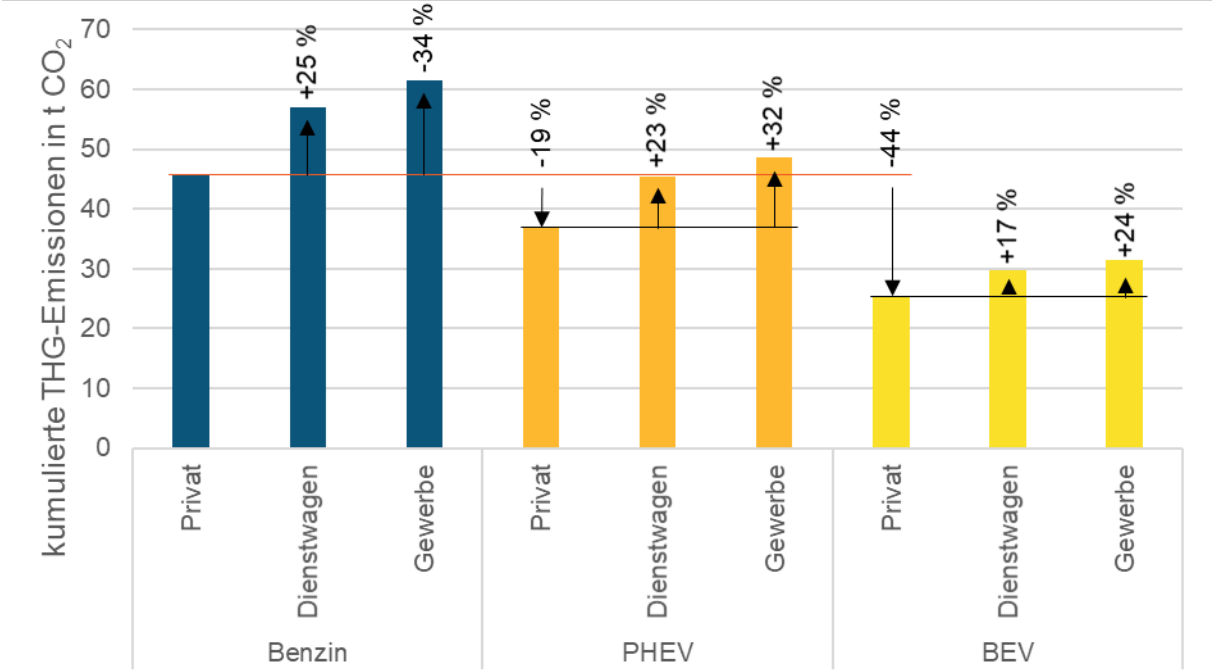


Abbildung 48 - Kumulierte THG-Emissionen ausgewählter Antriebe eines Fahrzeuges der Kompaktwagenklasse für eine Anschaffung in 2020 und verschiedene Nutzerklassen

Der Plug-In-Hybrid bildet hier das Bindeglied und weist zum einen Charakteristika des konventionellen Fahrzeugantriebs auf, was sich durch deutlich ansteigende THG-Emissionen durch eine Erhöhung der Fahrleistung widerspiegelt. Andererseits wird durch Nutzung des elektrischen Antriebs sowie extern zugeführter elektrischer Energie der hohe Wirkungsgrad und die positive THG-Bilanz elektrischen Stroms als Energieträger der Einfluss der steigenden Fahrleistung kompensiert, sodass die relativen Unterschieden zwischen den Nutzerklassen mit 23 % zwischen Dienstwagen- und Privatnutzer und 32 % zwischen gewerblicher und privater Nutzung kleiner ausfallen als beim konventionellen Antrieb, jedoch etwas über den relativen Unterschieden der batterieelektrischen Fahrzeuge liegen. Batterieelektrische Fahrzeuge weisen auf Grund des hohen Antriebswirkungsgrads im Vergleich die geringsten THG-Emissionen auf und weisen im Vergleich zum konventionellen Benzinantrieb 44 % geringere CO_2-Emissionen auf. Die Abhängigkeit von der Fahrleistung fällt auf Grund der vergleichsweise geringen THG-Emissionen in der Nutzungsphase und dem höheren Einfluss der Herstellung geringer aus, als den bei konventionellen und PHEV-Fahrzeugen der Fall ist.

3.2.5 Vergleich der Zusammensetzung

Abbildung 49 zeigt die kumulierten THG-Emissionen der einzelnen Lebenszyklusabschnitte ausgewählter Antriebsformen für ein Fahrzeug der Kompaktwagenklasse in privater Nutzung für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040. Es ist der bereits diskutierte Zusammenhang der THG-Emissionen und des Antriebstyps zu erkennen. Mit zunehmender Elektrifizierung des Antriebs sinken die CO_2-Emissionen signifikant ab. So weist ein batterieelektrisches Fahrzeug für das Anschaffungsjahr 2020 mit 25 t CO_2 einen 46 % geringeren

kumulierten THG-Fußabdruck auf, als es das Fahrzeug mit Benzinantrieb und 46 t CO_2 tut. Der Haupttreiber für diesen Unterschied ist in den THG-Emissionen in der Nutzungsphase zu lokalisieren. Beim Betrieb des elektrisch angetriebenen Fahrzeuges fallen keine Emissionen an, wohingegen das verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeug mit 29 t CO_2 in der Nutzungsphase hier seinen größten THG-Treiber aufweist.

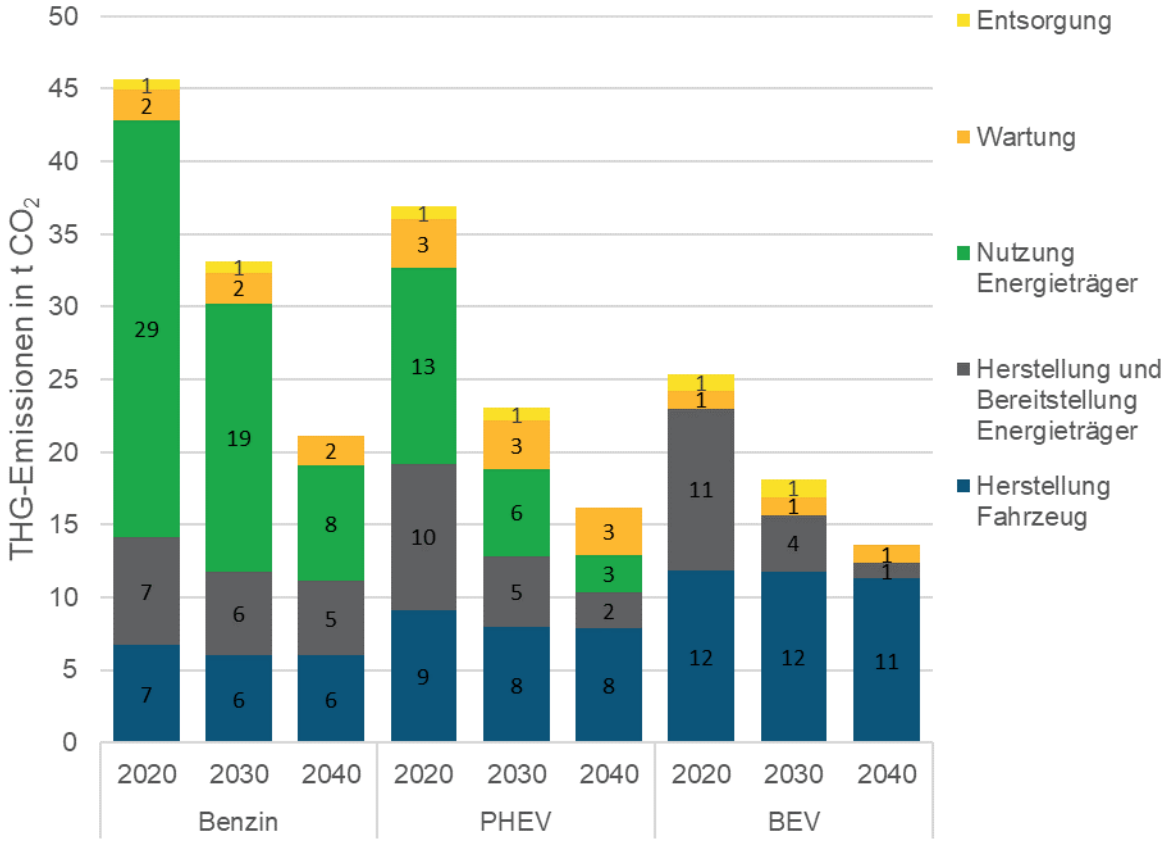


Abbildung 49 - Kumulierte THG-Emissionen der Lebenszyklusabschnitte ausgewählter Fahrzeugantriebe eines Fahrzeuges der Kompaktwagenklasse in privater Nutzung für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040.

Bei der Herstellung des batterieelektrischen Fahrzeuges hingegen kommt es auf Grund der großen Batteriekapazität, welche hohe THG-Emissionen bei ihrer Herstellung aufweist, zu um 71 % höheren THG-Emissionen im Vergleich zum Benzinantrieb. Zudem weist auch die Herstellung des Energieträgers um 57 %höhere THG-Emissionen für Strom im Vergleich zu Benzin auf. Das Plug-In-Hybrid-Fahrzeug kann auf Grund der Nutzung extern zugeführter, THG-armer elektrischer Energie eine deutliche Reduzierung der THG-Emissionen von 55 % im Vergleich zum Benzinfahrzeug in der Nutzungsphase vorweisen, wohingegen bei der Energieträgerherstellung ein Zuwachs von 43 % zu verzeichnen ist. In Summe bewegen sich die Gesamt-THG-Emissionen des Plug-In-Hybrid-Fahrzeugs für das Anschaffungsjahr 2020 mit 36 t CO_2 zwischen den beiden zuvor diskutierten Antrieben und liegen 22 % unter den Werten des Benzinantriebs.

Eine Analyse der THG-Emissionen mit Variation des Anschaffungsjahres zeigt, dass sich diese für die verschiedenen Antriebe zunehmend angleichen. So liegt der relative Unterschied der Gesamtemissionen im Jahr 2030 für ein batterieelektrisches Fahrzeug noch bei 54 % der Emissionen eines Benzinfahrzeugs und

nähern sich in 2040 mit einem relativen Unterschied von 62 % diesem weiter an. Dieses Verhalten ist vor allem auf eine Dekarbonsierung des Kraftstoffs durch Beimischung biogener und synthetischer Anteile zurückzuführen. Liegt der Anteil der THG-Emissionen in der Nutzungsphase eines Benzinfahrzeugs mit 29 t CO_2 im Jahr 2020 noch bei 63 % der Gesamtemissionen, so sinkt dieser Anteil für 2030 mit 19 t CO_2 auf 53 % und nimmt in 2040 mit 8 t CO_2 zu 38 % ab. Zusätzlich wird für das Jahr 2030 eine deutliche Wirkungsgradsteigerung am Verbrennungsmotor erwartet, welcher sich ebenfalls positiv auf die THG-Emissionen auswirkt. Die THG-Emissionen eines batterieelektrischen Fahrzeuges nehmen mit dem betrachteten Anschaffungsjahr ebenfalls ab, was durch eine Dekarbonisierung der Stromherstellung erklärt werden kann.

Beim Plug-In-Hybrid-Fahrzeug fällt auf, dass die THG-Emissionen in der Nutzungsphase in 2030 im Vergleich zu 2020 deutlich stärker reduziert werden können, als es für den konventionellen (in 2030 mild-hybridisierten) Antrieb der Fall ist. So liegt die Reduktion in dieser Phase für den Plug-In-Hybrid bei knapp 54 %, bei dem konventionellen Antrieb hingegen lediglich bei 35 %. Neben der Effizienzverbesserung des Verbrennungsmotors und der zunehmenden Dekarbonisierung des extern zugeführten Stroms kommt hier eine größere Batteriekapazität und ein verstärkt elektrischer Betrieb dieses Fahrzeuges zum Tragen.

3.2.6 Zusammenfassung der ökologischen Betrachtung

Abbildung 50 zeigt die kumulierten THG-Emissionen verschiedener Fahrzeugantriebe und Fahrzeugklassen für private Nutzer für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040. Darin sind die zuvor diskutierten Ergebnisse noch einmal erkennbar und können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die kumulierten THG-Emissionen steigen mit der Fahrzeuggröße und -masse für alle Antriebe auf Grund steigender Emissionen in der Nutzungsphase. Die Differenz zwischen einem Kleinwagen und einem SUV liegen je nach Antrieb in 2020 zwischen 42% und 98%, in 2040 zwischen 48% und 71%
- Mit den späteren Anschaffungsjahren sinken für alle Antriebsformen die kumulierten THG-Emissionen insbesondere auf Grund der Dekarbonisierung der Energieträger. Die Emissionen der ökologisch ineffizientesten Antriebe liegen in 2040 allerdings je nach Segment 50-70% über denen des effizientesten Antriebs.
- Konventionelle und mild-hybridisierte Fahrzeuge weisen für alle Fahrzeugsegmente und Anschaffungsjahre die größten kumulierten THG-Emissionen auf
- Batterieelektrische und Fahrzeuge mit Gasantrieb weisen in allen Fahrzeugsegmenten und für alle Anschaffungsjahre die geringsten THG-Emissionen auf. Dies ist insbesondere auf den geringen Emissionsfaktor der Energieträger zurückzuführen. Für Gasfahrzeuge ist dieses Ergebnis vor allem auf einen sehr hohen biogenen Anteil zurückzuführen.
- Mit dem Anschaffungsjahr werden die Unterschiede der kumulierten THG-Emissionen zwischen den verschiedenen Fahrzeugantrieben kleiner. Dieses Ergebnis ist auf die zunehmende Dekarbonisierung der flüssigen und gasförmigen Kraftstoffe zurückzuführen.
- Brennstoffzellenfahrzeuge bieten erst im Jahr 2040 aus CO_2-Sicht eine gleichwertige Alternative zu batterieelektrischen und Gasfahrzeugen.

- Die Fahrzeugherstellung hat zukünftig einen prozentual deutlich höheren Anteil an den Gesamtemissionen eines Fahrzeugs.

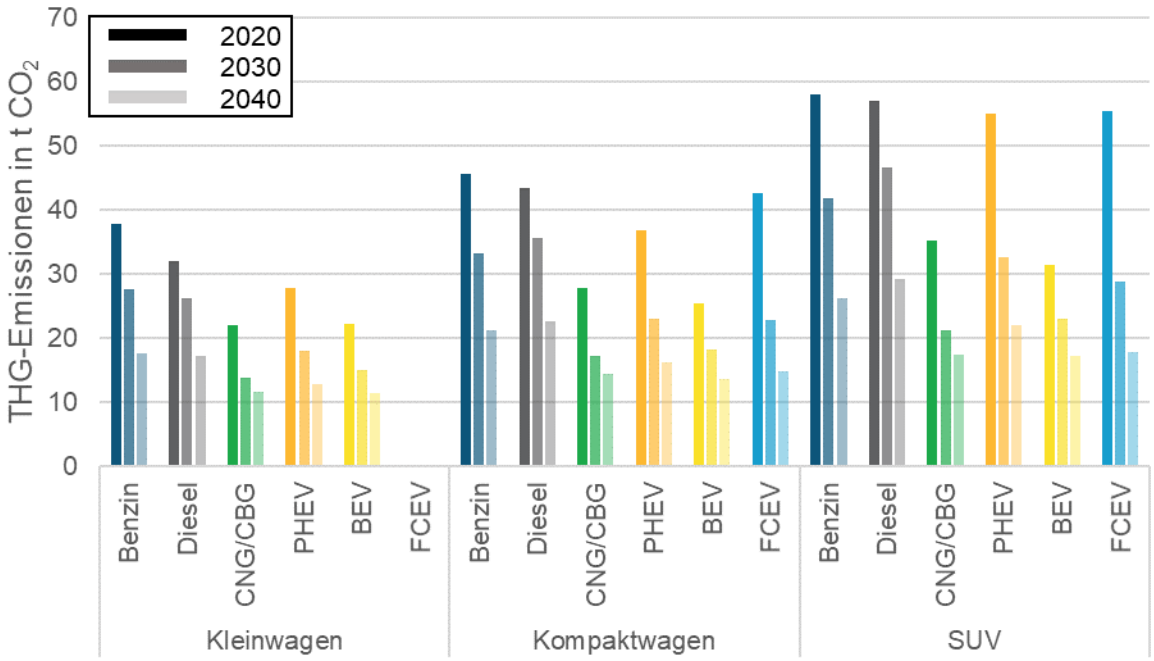


Abbildung 50 - THG-Emissionen über die Lebensdauer unterschiedlicher Fahrzeugklassen in privatem Gebrauch für verschiedene Anschaffungsjahre

3.3 Ergebnisse der technischen Betrachtung

Die technische Effizienz eines Fahrzeugs wird anhand des Primärenergiebedarfs über den gesamten Lebenszyklus bewertet. Im Folgenden wird der Primärenergiebedarf eines Fahrzeugs mit verschiedenen Antriebsformen, Fahrzeugsegmenten, Nutzertypen sowie Anschaffungsjahren analysiert.

3.3.1 Antriebsvergleich

Abbildung 51 zeigt den Primärenergiebedarf über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs aus der Kompaktklasse in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020. Es ist darin eine starke Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs vom Antriebstyp erkennbar. So zeigt das batterieelektrische Fahrzeug einen im Vergleich zu den übrigen Antrieben hohen Energiebedarf in der Fahrzeugherstellung, was auf die Batterie zurückzuführen ist. Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen ebenfalls mehr Energie in der Fahrzeugherstellung, was auf den elektrischen Speicher sowie die energieintensive Herstellung der Brennstoffzelle zurückgeführt werden kann. Auf Grund der Mischform und der Notwendigkeit des Verbrauchs zweier Antriebe und Speicher weist der Plug-In-Hybrid ebenfalls höhere Energiebedarfe in der Herstellung auf, als konventionelle Fahrzeuge. Im weiteren Verlauf ist der Primärenergiebedarf des batterieelektrischen Fahrzeugs dann deutlich niedriger, als es bei den übrigen Fahrzeugantrieben der Fall ist. Der hohe Wirkungsgrad des Antriebs sowie der Energieträgerherstellung begründen dieses Verhalten. Konventionelle Fahrzeuge weisen einen deutlich höheren Primärenergiebedarf in der Nutzungsphase auf, was auf den vergleichsweise geringen

Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors zurückzuführen ist. Die Brennstoffzellenfahrzeuge sind aus energetischer Sicht hier mit den konventionellen Antrieben vergleichbar, der Primärenergiebedarf wird hier jedoch vor allem durch die energieintensive Energieträgerherstellung begründet. Ähnliches gilt für das gasangetriebene Fahrzeug. Dieses weist den höchsten Primärenergiebedarf auf, was auf einen hohen biogenen Kraftstoffanteil zurückzuführen ist. Plug-In-Hybride weisen auf Grund der Nutzung extern zugeführter elektrischer Energie einen geringeren Primärenergiebedarf auf als konventionelle Fahrzeuge, liegen durch die Nutzung des Verbrennungsmotors jedoch auch über dem Primärenergiebedarf batterieelektrischer Fahrzeuge. Vergleicht man den Primärenergiebedarf des batterieelektrischen Fahrzeuges mit dem eines konventionellen Antrieb, so zeigt sich, dass der höhere Primärenergiebedarf in der Herstellung des BEV durch die geringen Bedarfe in der Nutzungsphase nach etwa 40.000 km kompensiert ist. Aus energetischer Sicht bedeutet dies, dass das batterieelektrische Fahrzeuge nach eben diesen 40.000 km den effizienteren Antrieb darstellt als der konventionelle Antrieb.

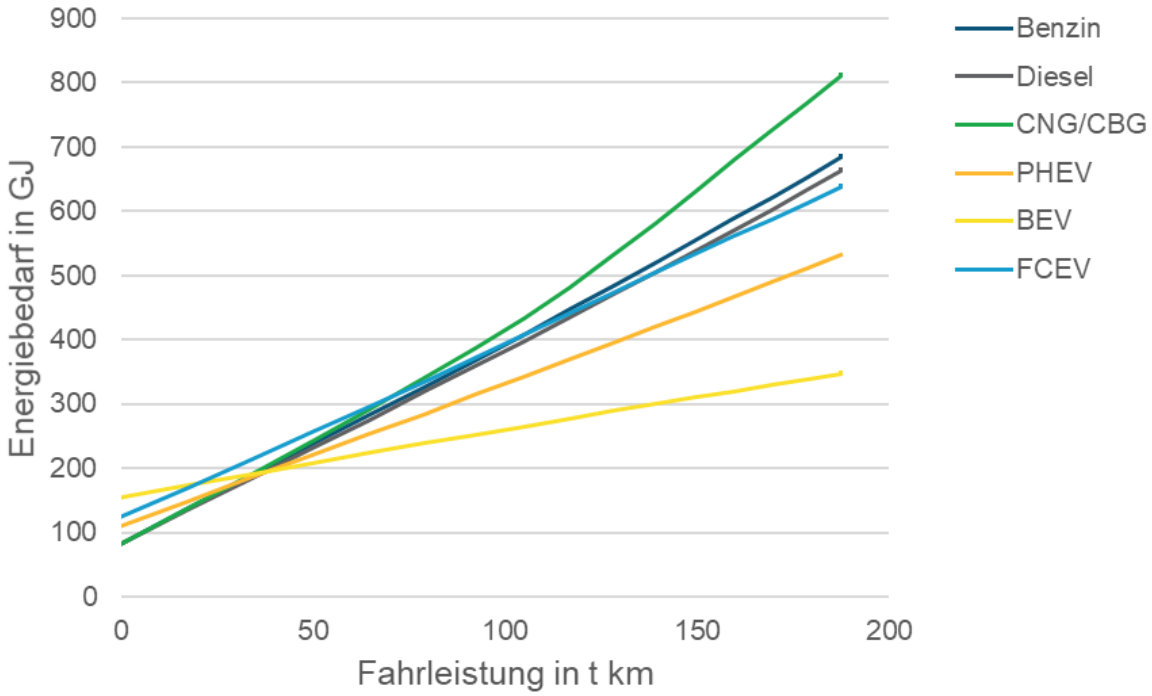


Abbildung 51 - Primärenergiebedarf verschiedener Antriebsformen für ein Fahrzeug der Kompaktklasse in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020

Abbildung 52 zeigt den kumulierten Primärenergiebedarf der betrachteten Fahrzeugantriebe für verschiedene Fahrzeugsegmente für eine private Nutzerklasse und das Anschaffungsjahr 2020. Es wird in der Abbildung der relative Unterschied zwischen den Antrieben in einem Fahrzeugsegment sowie für den konventionellen Benzinantrieb der relative Unterschied des Primärenergiebedarfs zwischen den Fahrzeugsegmenten dargestellt. In der Kleinwagenklasse wurde aus ökonomischen Argumenten kein Brennstoffzellenfahrzeug modelliert. Es lässt sich grundsätzlich die Tendenz erkennen, dass große, massereiche Fahrzeuge einen höheren Primärenergiebedarf aufweisen als die entsprechenden Fahrzeuge aus den kleineren Segmenten. So wird für ein Benzinfahrzeug in der Kompaktwagenklasse bereits 21 % mehr

Primärenergie benötigt. Dies lässt sich durch den hohen Energiebedarf bei der Herstellung des Fahrzeuges, sowie hohe Energiebedarfe in der Nutzungsphase erklären. Es lässt sich außerdem feststellen, dass Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb in den hier betrachteten Fahrzeugklassen stets den niedrigsten Primärenergiebedarf aufweisen. So kann in allen drei Segmenten durch den Einsatz eines batterieelektrischen Fahrzeuges der Primärenergiebedarf im Vergleich zum konventionellen Benzinantrieb nahezu halbiert werden. Dieser Effekt lässt sich durch den hohen Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs und damit verbundenen geringen Energiebedarf in der Nutzungsphase erklären.

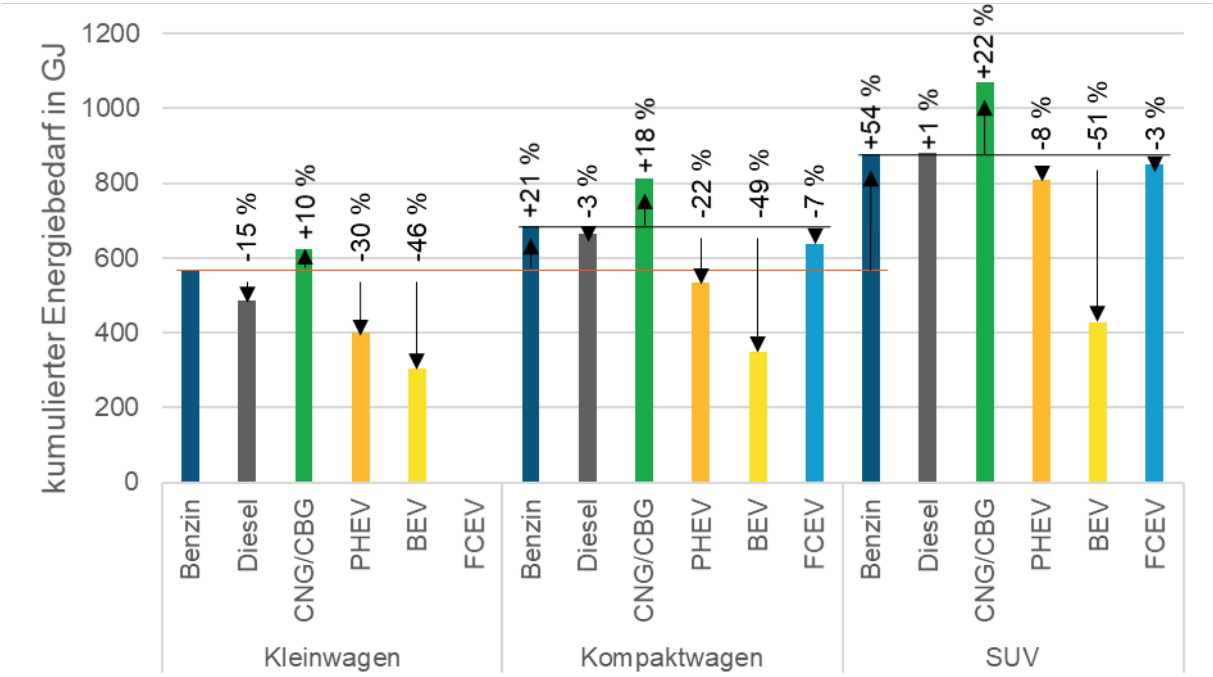


Abbildung 52 - Kumulierter Primärenergiebedarf verschiedener Fahrzeugantriebe und -segmente in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020

Konventionelle Dieselantriebe spielen ihren Vorteil bzgl. des Primärenergiebedarfs im Vergleich zu ihren ottomotorischen Pendants mit 15 % vor allem im Kleinwagensegment aus. Im Kompaktwagensegment liegt der Vorteil dieses Antriebs gegenüber dem Benzinantrieb lediglich bei drei Prozent und im SUV-Segment liegt dieser sogar ein Prozent höher. Dieser Effekt lässt sich auf eine Angleichung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase zurückführen. Eine Analyse des streckenspezifischen Energieverbrauchs der verbrennungsmotorischen Antriebe, wie er in Abbildung 53 dargestellt ist, zeigt, dass der Benzinantrieb in der Kleinwagenklasse einen Energiemehrverbrauch von knapp 29 % aufweist. In der Kompaktwagenklasse fällt dieser relative Mehrverbrauch auf gut 8 % und gleicht sich im SUV-Segment mit einem relativen Energiemehrverbrauch von knapp 3 % weiter an. Durch den höheren biogenen Anteil im Dieselkraftstoff wird der Energiebedarfsvorteil in der Nutzungsphase durch den höheren Energiebedarf in der Herstellungsphase des Kraftstoffs weiter gedrückt, sodass sich die Ergebnisse in Abbildung 52 ergeben. Ein ähnliches Verhalten bzgl. des Energiebedarfs in der Nutzungsphase zeigt die Betrachtung der Gasfahrzeuge. Der deutlich höhere Energiebedarf kann hier auf den energieintensiven Herstellungsprozess des Kraftstoffs mit hohen Bioanteilen zurückgeführt werden.

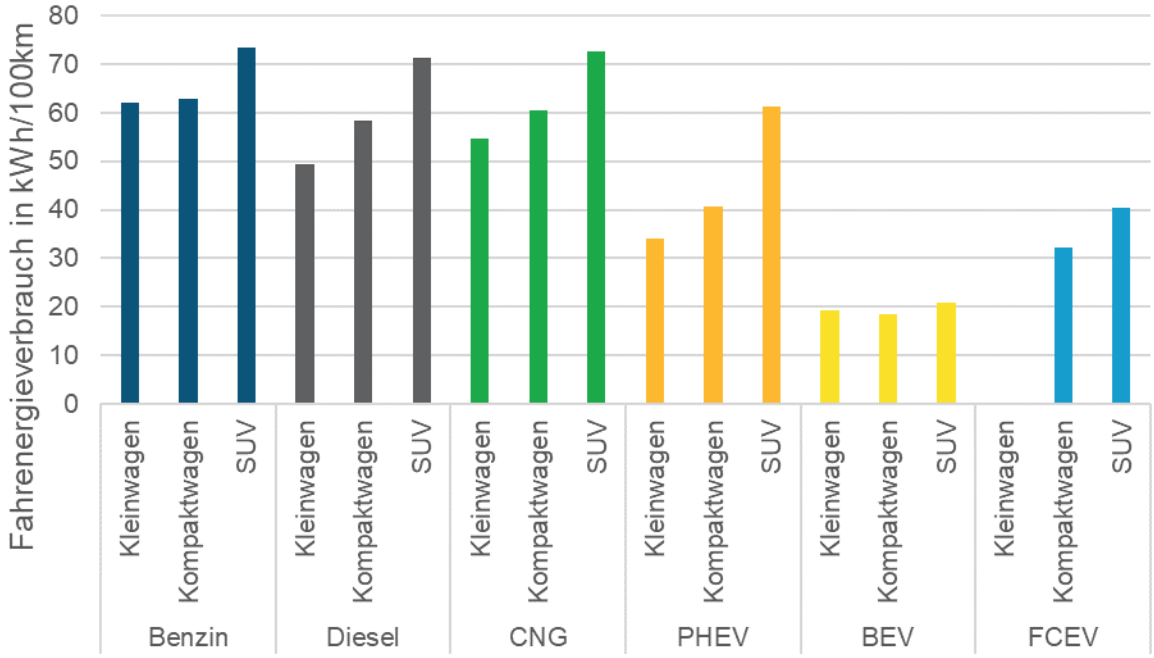


Abbildung 53 - Fahrenergiebedarfe verschiedene Antriebe und Fahrzeugsegmente im Jahr 2020

Plug-In-Hybride zeigen nach den batterieelektrischen Fahrzeugen das größte Potential zur Absenkung des Primärenergiebedarfs in den hier betrachteten Fahrzeugklassen auf. So kann durch den Einsatz eines solchen Antriebs im Kleinwagensegment eine deutliche Reduzierung von 30 % des Primärenergiebedarfs im Gegensatz zu einem konventionellen Benzinantrieb erreicht werden. In der Kompaktwagenklasse ist eine Absenkung um 22 % möglich, die SUV-Klasse zeigt hier nur noch ein Potential von 8 %. Das mit der Fahrzeuggröße sinkende Potential zur Reduktion des Primärenergiebedarfs ist durch die mit dem Fahrzeuggewicht und eine nicht vollständige Kompensation der Gewichtszunahme in der Kapazität der Batterie (siehe Abbildung 11) absinkende Möglichkeit rein elektrischen Fahrens verbunden. Dadurch kann im gesamten Lebenszyklus weniger aus energetischer Sicht vorteilhaftes elektrisches Fahren realisiert werden, sodass der Vorteil mit dem Fahrzeugsegment sinkt.

3.3.2 Vergleich ausgewählter Fahrzeugantriebe für verschiedene Anschaffungsjahre

Abbildung 54 stellt den Primärenergiebedarf ausgewählter Antriebe für die Kompaktwagenklasse für den Privatnutzer und die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040 über den gesamten Lebenszyklus dar. Es ist der bereits diskutierte hohe Energiebedarf bei der Herstellung batterieelektrischer Fahrzeuge zu erkennen. Darüber hinaus lässt sich der Darstellung entnehmen, dass für alle drei modellierten Anschaffungsjahre der Primärenergiebedarf für einen konventionellen Benzin-Antrieb am größten ist, was auf einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad in der Nutzungsphase zurückzuführen ist. Der energetische Mehrbedarf bei der Fahrzeugherstellung batterieelektrischer Fahrzeuge wird durch den hohen Wirkungsgrad des BEV nach etwa 50.000 km Nutzung ausgeglichen. Weiterhin lässt sich Abbildung 54 entnehmen, dass der Primärenergiebedarf für rein elektrische Fahrzeuge nahezu unabhängig vom betrachteten Anschaffungsjahr ist. Lediglich bei der Herstellung ist ein signifikanter Anstieg des Primärenergiebedarfs zu erkennen, da ab 2030 deutlich größere Traktionsbatterien verbaut werden, um hohe Anforderungen an die Reichweite zu erfüllen. In der Nutzungsphase ist der Primärenergiebedarf ab 2030 auf Grund eines leicht steigenden

Wirkungsgrads des Antriebs sowie der Ladetechnologie etwas geringer, sodass 2030 und 2040 am Lebensende etwa derselbe Primärenergiebedarf besteht, wie im Anschaffungsjahr 2020. Ein Vergleich der verschiedenen Anschaffungsjahre zeigt darüber hinaus, dass es für 2030 zunächst eine Absenkung der zu erwartenden Primärenergiebedarfe bei Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb gibt. Dieser Effekt ist auf einen steigenden Wirkungsgrad der verbauten Verbrennungsmotoren zurückzuführen. Ab 2030 nehmen dann die Anteile biogener und synthetischer Kraftstoffkomponenten, welche einen hohen Primärenergiebedarf bei ihrer Herstellung aufweisen (siehe Kapitel 2.6.2), zu. Dies führt dazu, dass der Energiebedarf zum Jahr 2040 dann wieder deutlich ansteigt, und der Primärenergiebedarf für das konventionell angetriebene Fahrzeug in 2040 deutlich über dem des Fahrzeuges aus 2020 liegt. Bei Plug-In-Hybriden tritt dieser Effekt auf Grund der Nutzung extern zugeführter elektrischer Energie in abgeschwächter Form auf und wird durch den steigenden Anteil elektrischen Vortriebs sogar überkompensiert, sodass der Primärenergiebedarf für diesen Antriebstyp in 2020 als am größten eingeschätzt wird.

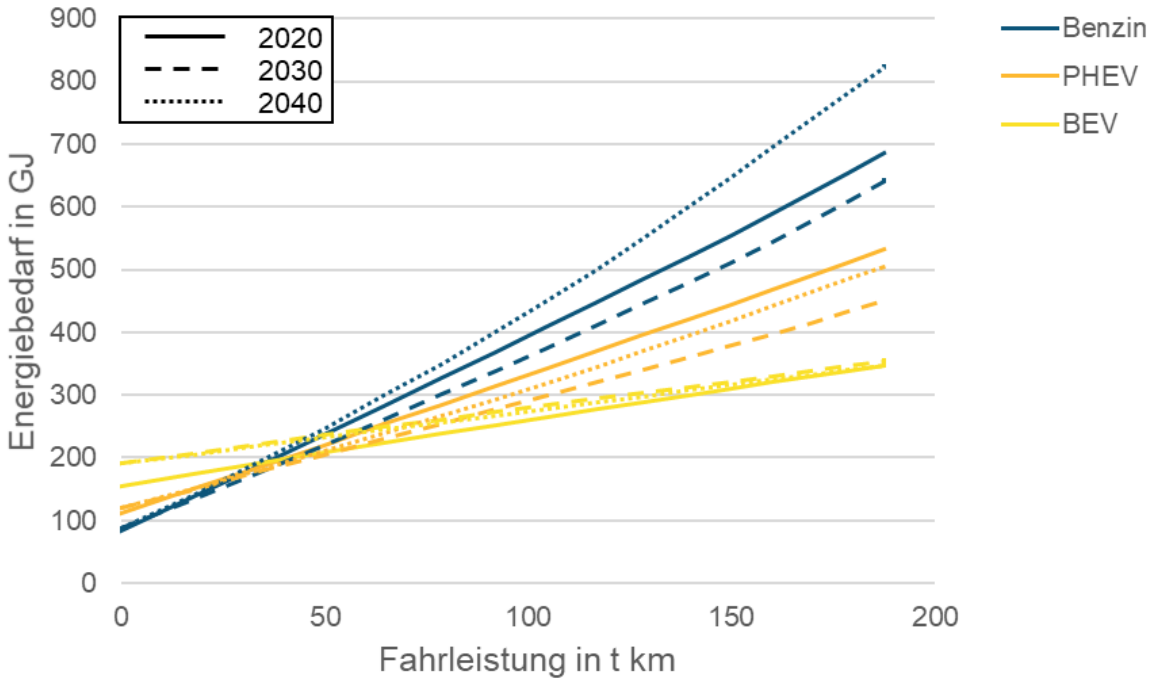


Abbildung 54 - Primärenergiebedarf ausgewählter Antriebe in der Kompaktwagenklasse in der privaten Nutzung für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040

Abbildung 55 zeigt den kumulierten Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe für ein Fahrzeug aus der Kompaktwagenklasse für einen privaten Nutzer in den drei modellierten Anschaffungsjahren 2020, 2030 und 2040 in Gigajoule. Es sind darin außerdem die relativen Unterschiede zum einen zwischen den dargestellten Antrieben zum anderen für die unterschiedlichen Anschaffungsjahre aufgezeigt. Es ist zu erkennen, dass der primärenergiebedarf mit steigender Hybridisierung abnimmt. So weist ein Plug-In-Hybrid einen um 22 % reduzierten Primärenergiebedarf im Vergleich zum entsprechenden Fahrzeug mit Benzinantrieb im Jahr 2020 auf. Das batterieelektrische Fahrzeug in dieser Klasse und zum entsprechenden Anschaffungsjahr weist gar eine 49-prozentige Reduzierung des Primärenergiebedarfs auf. Die starke Reduzierung des Primärenergiebedarfs ist auf den signifikant höheren Wirkungsgrad des elektrischen

Antriebs und der damit verbundenen geringeren Energieaufwendung in der Nutzungsphase zurückzuführen. Ein Vergleich des Primärenergiebedarfs des konventionellen Benzinantriebs in den verschiedenen Anschaffungsjahren zeigt, dass diese in 2030 um etwa sechs Prozent im Vergleich zu 2020 abnimmt. Dieser Effekt ist auf den steigenden Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors zurückzuführen, welcher in Kapitel 2.3.1erläutert wurde. Dem entgegen wirkt eine Zunahme der energieintensiven biogenen und synthetischen Kraftstoffanteile, sodass der Wirkungsgradzuwachs von 17 % (siehe Kapitel 2.3.1) abgeschwächt und nicht eins zu eins im Primärenergiebedarf abgebildet wird. Nach 2030 geht die Modellierung davon aus, dass kein Wirkungsgradzuwachs am Antriebsaggregat mehr wirkt. Der Anteil biogener und synthetischer Kraftstoffanteile nimmt in dem betrachteten Zeitraum jedoch deutlich zu (siehe Kapitel 2.3.3), sodass für das Anschaffungsjahr 2040 mit einem Anstieg des Primärenergiebedarfs um 20 % für mit Flüssigkraftstoffen betriebene Fahrzeuge zu rechnen ist. Da ein analoges Verhalten für Gasfahrzeuge zu erwarten ist, werden die entsprechenden Ergebnisse hier nicht dargestellt.

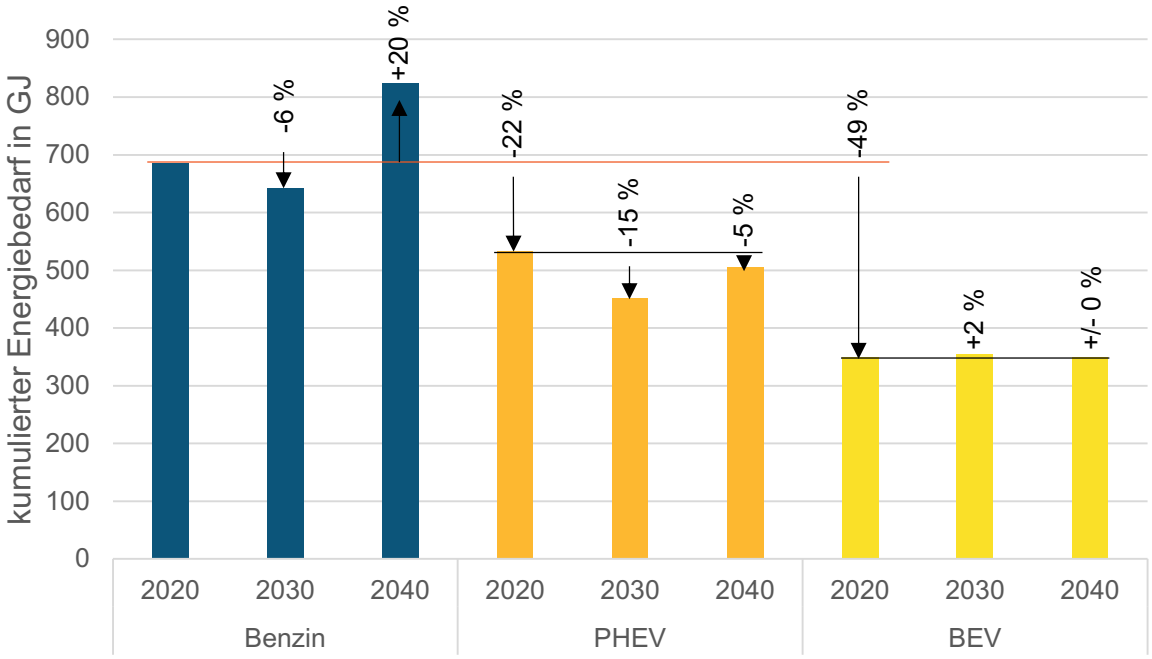


Abbildung 55 - Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe in der Kompaktwagenklasse und privater Nutzung für verschiedene Anschaffungsjahre

Für Plug-In-Hybride ist für das Anschaffungsjahr 2030 eine 15-prozentige Reduzierung des Primärenergiebedarfs ausgewiesen. Dieses Verhalten lässt sich zum einen auf einen Anstieg des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades zurückführen, zum anderen steigt der Anteil der elektrischen Vortriebsenergie durch Veränderungen im Utility Faktor, sodass die Reduzierung des Primärenergiebedarfs hier deutlicher ausfällt als beim konventionellen Fahrzeugantrieb mit Benzin. Im Gegensatz zu den rein konventionellen Fahrzeugantrieben ist kein Anstieg des Primärenergiebedarfs für Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge für das Anschaffungsjahr 2040 zu erkennen, sondern eine geringfügige Reduzierung. Der Sachverhalt lässt sich durch den steigenden Anteil elektrischer Energie in der Nutzungsphase erklären (siehe Kapitel 2.3.1). Die vermehrte Nutzung des wirkungsgradgünstigeren elektrischen Antriebes im Plug-In-Hybrid wirkt dem steigenden Primärenergiebedarf für biogene und synthetische Kraftstoffe entgegen, sodass für 2040 eine leichte Reduzierung des Primärenergiebedarfs im Vergleich zu 2020 um etwa 5 Prozent berechnet wird.

Der Wirkungsgrad batterieelektrischer Fahrzeuge sowie der dazugehörigen Ladetechnologie nimmt bis ins Jahr 2030 noch um etwa zehn Prozent zu (siehe Kapitel 2.3.1). Dennoch wird für 2030 ein leichter Anstieg um 2 % und in 2040 von ±0 im Primärenergiebedarf erwartet. Dieses Verhalten lässt sich durch die deutlich steigende Batteriekapazität erklären. Diese führt bei der Herstellung und der Entsorgung zu einem solch starken Anstieg des Energiebedarfs, dass der Wirkungsgradvorteil fast gänzlich ausgeglichen wird.

3.3.3 Vergleich des Primärenergiebedarfs in Abhängigkeit der Hybridisierung

Abbildung 56 zeigt den Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe für ein Fahrzeug in der Kompaktwagenklasse und einen privaten Nutzer im Anschaffungsjahr 2020 für verschiedene Hybridisierungsgrade über den gesamten Lebenszyklus. Es ist dabei der grundsätzliche Mehrbedarf bei der Herstellung des Plug-In-Hybrids auf Grund der verbauten Traktionsbatterie zu erkennen. Dieser Mehrbedarf wird nach etwa 30.000 km durch einen geringeren Energiebedarf in der Nutzungsphase kompensiert. Darüber hinaus lässt sich ableiten, dass der Primärenergiebedarf mit steigender Hybridisierung sinkt. Dieses Verhalten lässt sich mit sinkenden Energiebedarfen während der Nutzungsphase erklären. Diese sinken mit steigendem Elektrifizierungsgrad auf Grund der Nutzung von außen zugeführter elektrischer Energie bei Plug-In-Hybriden sowie umfangreichen Hybridfunktionen wie elektrisches Fahren, starke Lastpunktverschiebung und Bremsenergierückgewinnung beim Full-Hybrid-Fahrzeug. Der Vorteil der Mild-Hybridisierung fällt auf Grund geringer elektrischer Leistungen und der damit verbundenen eingeschränkten Hybridfunktionalität vergleichsweise gering aus, sodass sich im Vergleich zum konventionellen Antrieb kaum ein erkennbarer Vorteil bzgl. des Primärenergiebedarfs ergibt.

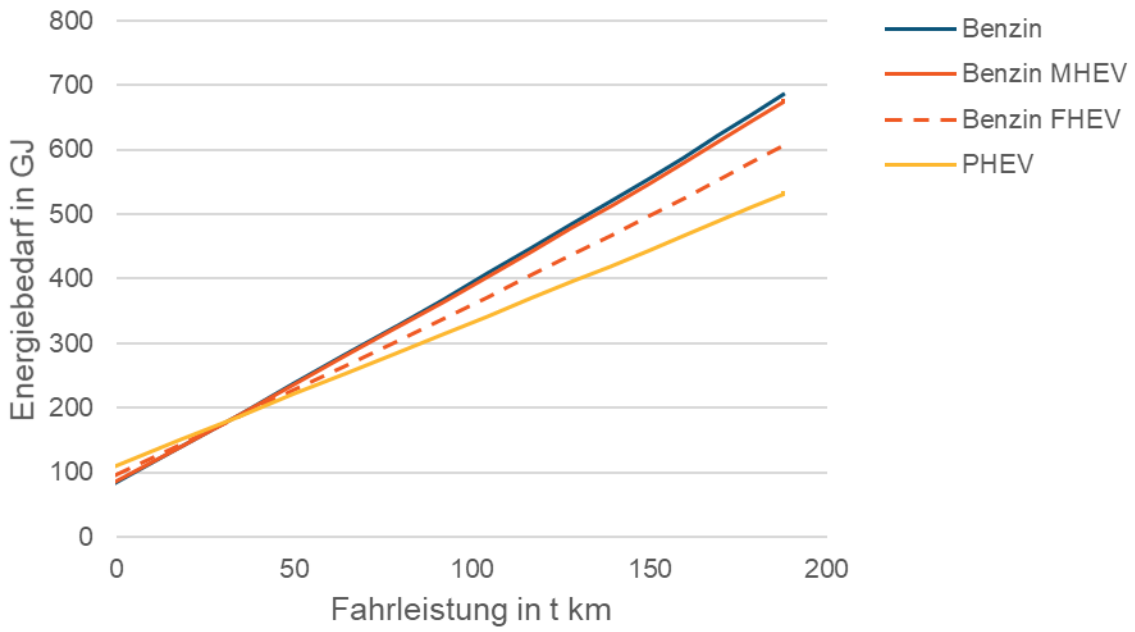


Abbildung 56 - Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe in der Kompaktwagenklasse und privater Nutzung für verschiedene Hybridisierungsgrade im Anschaffungsjahr 2020

Abbildung 57 zeigt den kumulierten Primärenergiebedarf für ein Fahrzeug der Kompaktwagenklasse und einen privaten Nutzer im Anschaffungsjahr 2020 für verschieden stark ausgeprägte Hybridisierungen. Es ist darin der relative Unterschied im Energiebedarf im Vergleich zum konventionellen Benzinantrieb aufgezeigt. Wie bereits zuvor diskutiert, zeigen mild-hybridisierte Antriebe auf Grund ihrer beschränkten Hybridfunktionen nur wenig Potential zur Reduktion des Primärenergiebedarfs. Full-Hybrid-Fahrzeugantriebe weisen einen um 11 % reduzierten kumulierten Primärenergiebedarf im Vergleich zum konventionellen Antrieb auf. Die Möglichkeit durch eine leistungsstarke elektrische Maschine sowie eine entsprechende Batteriekapazität kurze Strecken elektrisch zu fahren sowie deutliche Lastpunktverschiebungen am Verbrennungsmotor vorzunehmen erweisen sich bei dieser Technologie als gewinnbringend bzgl. des Primärenergiebedarfs. Eine weitere deutliche Reduzierung des Primärenergiebedarfs gelingt durch den Einsatz von Plug-In-Hybridantrieben. Durch die Nutzung extern zugeführter elektrischer Energie, die Möglichkeit auch größere Strecken sowie höhere Geschwindigkeit als beim FHEV rein elektrisch abzubilden sowie den weiteren Hybridfunktionen, die auch beim FHEV zur Verfügung stehen, kann der Primärenergiebedarf im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug um 22 % reduziert werden.

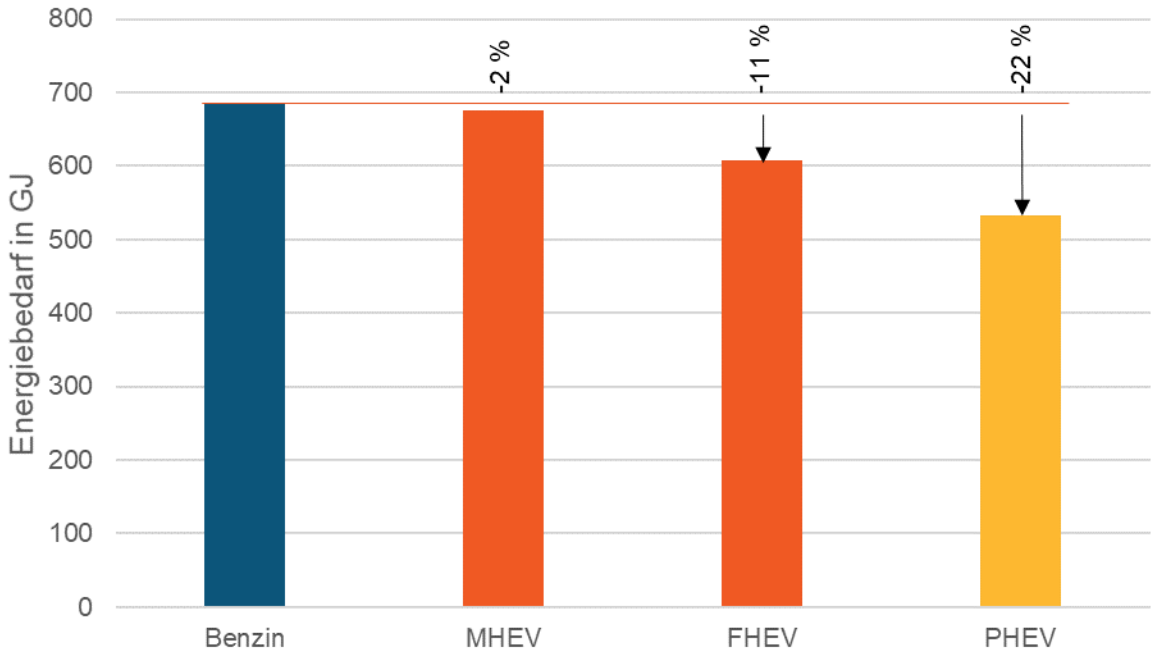


Abbildung 57 - Kumulierter Primärenergiebedarf eine Kompaktwagens in privater Nutzung bei verschiedenen Hybridisierungsgraden im Anschaffungsjahr 2020

3.3.4 Vergleich Nutzertypen

Abbildung 58 zeigt den Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe für ein Fahrzeug der Kompaktwagenklasse im Anschaffungsjahr 2020 für verschiedene Nutzertypen. Es lässt sich zunächst der eindeutige, lineare Zusammenhang zwischen Laufleistung und Primärenergiebedarf erkennen. Durch die hohen Laufleistungen von Gewerbefahrzeugen weisen diese entsprechend die größten Energiebedarfe auf. Dieser Zusammenhang gilt unabhängig vom betrachteten Antriebstyp. Darüber hinaus lässt sich der hohe

Energieaufwand für konventionelle Fahrzeuge im Vergleich zu stark elektrifizierten Antrieben erkennen. Dieses Verhalten lässt sich auf die zuvor im Detail geschilderten Zusammenhänge zurückführen. Grundsätzlich ist nur ein geringer Einfluss des Nutzertyps auf den Primärenergiebedarf zu erkennen. Wird die Laufleistung ausgeklammert, so ergibt sich für die verschiedenen Nutzer nur ein geringer Einfluss auf den Primärenergiebedarf.

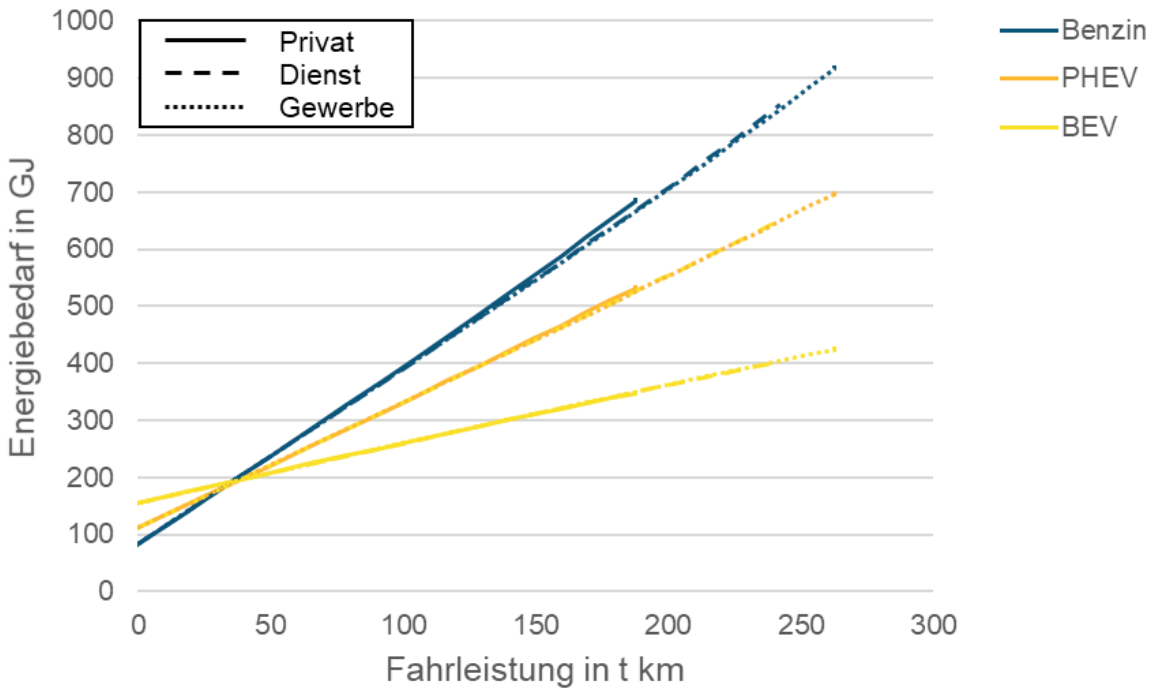


Abbildung 58 - Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe für ein Fahrzeug in der Kompaktwagenklasse im Anschaffungsjahr 2020 für verschiedene Nutzer

Abbildung 59 zeigt den kumulierten Primärenergiebedarf ausgewählter Antriebe für ein Fahrzeug der Kompaktwagenklasse für das Anschaffungsjahr 2020 und verschiedene Nutzertypen. Es ist der relative Unterschied im Primärenergiebedarf im Vergleich zum konventionellen Benzinantriebe sowie die Unterschiede zwischen jeweiligen Nutzertypen. Auf die Unterschiede des Primärenergiebedarfs zwischen den betrachteten Antrieben wurde in Kapitel 3.3.1 bereits ausführlich eingegangen. Abbildung 59 zeigt darüber hinaus, dass der Primärenergiebedarf mit steigender Laufleistung ebenfalls zunimmt, sodass für ein Fahrzeug mit konventionellem Antrieb ein Zuwachs des Primärenergiebedarfs von 24 % für ein Dienstwagenfahrzeug im Vergleich zu einem privaten Nutzer zu verzeichnen ist. Der Unterschied eines gewerblich genutzten Fahrzeugs liegt im Vergleich zur privaten Nutzung auf Grund der noch höheren Laufleistung bei 34 %.

Für batterieelektrische Fahrzeuge ist grundsätzlich ein vergleichbares Verhalten zu beobachten, jedoch fallen hier die relativen Unterschiede weniger stark aus, als es beim konventionellen Fahrzeug der Fall ist. Dieser Sachverhalt ist auf den elektrischen Antrieb zurückzuführen. Auf Grund des hohen Wirkungsgrades des batterieelektrischen Antriebs und dem damit verbundenen geringen streckenbezogenen Primärenergiebedarf, fällt die Fahrmehrleistung weniger stark ins Gewicht als bei konventionellem Antrieb.

Der Plug-In-Hybrid bildet hier eine Art Kompromiss, sodass die Veränderungen im Primärenergiebedarf durch den Nutzertyp für diesen Antriebstyp weniger stark ausgeprägt sind als es beim konventionellen Fahrzeug der Fall ist, jedoch über denen des batterieelektrischen Fahrzeuges liegen.

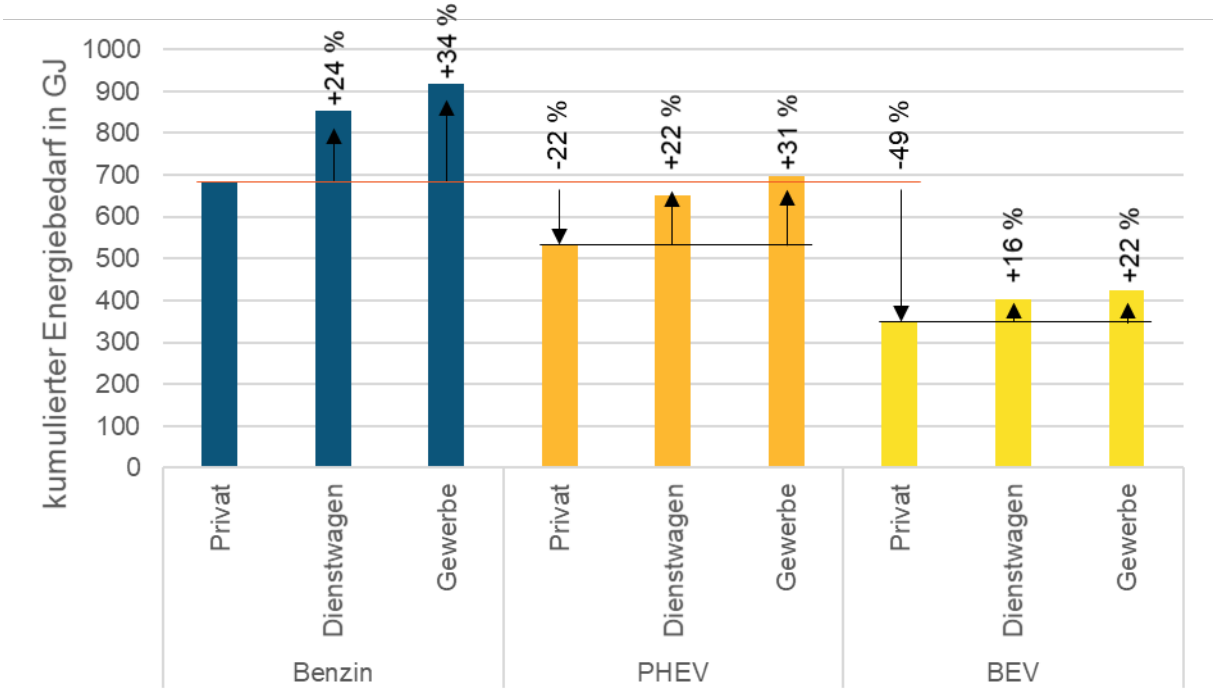


Abbildung 59 - Kumulierter Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe eines Fahrzeuges in der Kompaktwagenklasse im Anschaffungsjahr 2020 für verschiedene Nutzer

3.3.5 Vergleich der Zusammensetzung

Abbildung 60 zeigt die kumulierten Primärenergiebedarfe der einzelnen Lebenszyklusabschnitte eines Kompaktwagens in privater Nutzung für ausgewählte Antriebe und die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040. Es ist darin zunächst zu erkennen, dass der batterieelektrische Antrieb den geringsten Primärenergiebedarf aufweist, was vor allem auf den hohen Wirkungsgrad des Antriebs und damit einhergehend geringem Energiebedarf in der Nutzungsphase erklärt werden kann. So wird beispielsweise im Jahr 2020 mit 127 GJ im Vergleich zu einem konventionellen Benzinantrieb, für welchen in der Nutzung 425 GJ Primärenergie benötigt werden, mehr als 70 % weniger Primärenergie aufgewandt. Im Gegensatz zu dem konventionellen Antrieb lässt sich außerdem festhalten, dass der Energiebedarf bei der Herstellung zum einen signifikant größer ist und für das Jahr 2020 im direkten Vergleich einen relativen Energiemehrbedarf von knapp 85 % aufweist, zum anderen am Gesamtenergiebedarf des BEV auch einen größeren Teil einnimmt. So liegt der Anteil der während der Herstellung aufzuwendenden Energie bei etwa 45 %, wobei beim Benzinantrieb lediglich gut 12 % des Primärenergiebedarfs auf die Fahrzeugherstellung entfallen. Ein weiterer signifikanter Unterschied zwischen den Antrieben ergibt sich bei der Betrachtung des Primärenergiebedarfs bei der Herstellung und Bereitstellung des Energieträgers. Hier weist du im BEV zum Einsatz kommende Strom einen deutlichen energetischen Vorteil auf und liegt mir 41 GJ für das Jahr 2020 über 70 % unter dem Bedarf für die Herstellung und Bereitstellung des Flüssigkraftstoffs für den Benzinantrieb. Der Antriebsmix in einem Plug-In-Hybrid wirkt sich positiv auf die Gesamtbilanz im Jahr 2020

aus. Der kumulierte Primärenergiebedarf liegt deutlich unter dem des konventionellen Antriebs, jedoch auch signifikant über dem eines batterieelektrischen Fahrzeuges. Die große Batteriekapazität wirkt sich nachweislich auf den Primärenergiebedarf bei der Fahrzeugherstellung aus. Die Nutzung elektrischer Energie in der Nutzungsphase sowie der Hybridfunktionen zu Anhebung des Wirkungsgrads des Verbrennungsmotors wirken sich positiv auf den Energieaufwand in der Nutzungsphase aus, sodass für diesen Posten eine deutliche Reduzierung um mehr als 35 % auszuweisen ist.

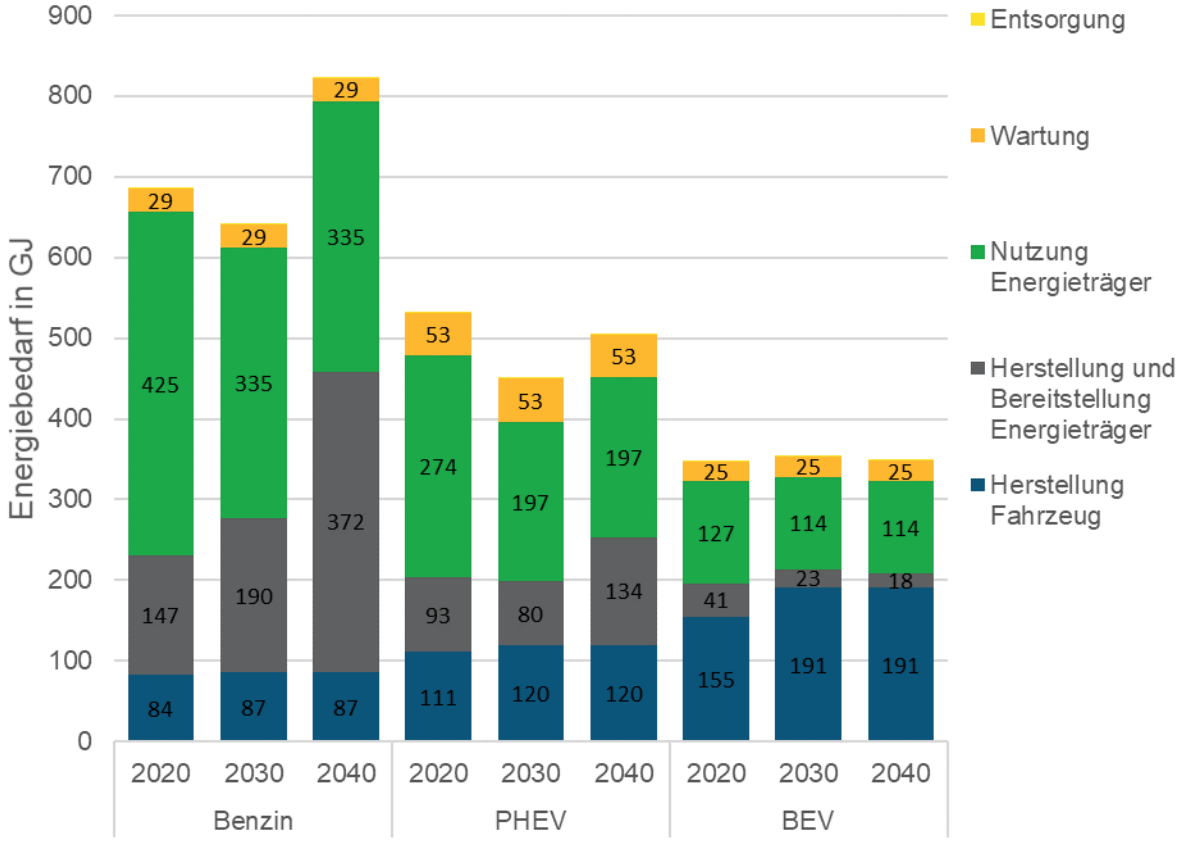


Abbildung 60 - Kumulierter Primärenergiebedarf der Lebenszyklusabschnitte ausgewählter Antriebe für einen Kompaktwagen in privater Nutzung für verschiedene Anschaffungsjahre

Eine Analyse der verschiedenen Anschaffungsjahre zeigt, dass sich die Unterschiede im Primärenergiebedarf teilweise sogar verschärfen. Für das Jahr 2030 wird eine Reduktion des Primärenergiebedarfs für den konventionellen Antrieb um knapp sieben Prozent prognostiziert, was auf Wirkungsgradverbesserungen beim Verbrennungsmotor auf der einen Seite, und Beimischungen energieintensiver Kraftstoffanteile auf der anderen Seite zurückzuführen ist. Die Wirkungsgradsteigerung am Verbrennungsmotor schlägt sich mit einer Reduktion des Primärenergiebedarfs in der Nutzungsphase um 22 % im Vergleich zu 2020 nieder. Gleichzeitig steigt der Primärenergiebedarf bei der Energieträgerherstellung für Benzinkraftstoff von 147 GJ in 2020 auf 190 GJ in 2030 um gut 29 %. Für das Jahr 2040 wird dann eine deutliche Zunahme des Primärenergiebedarfs von 20 % im Vergleich zu 2020 für den Benzinantrieb ermittelt. Dieser Zuwachs ist allein auf den steigenden Energiebedarf bei der Kraftstoffherstellung durch Zunahmen synthetischer und biogener Kraftstoffanteile zurückzuführen. Dieser schlägt mich über 95 % Energiemehrbedarf im Vergleich zu 2030 zu buche.

Grundsätzlich lässt sich zudem festhalten, dass bei konventionellen Fahrzeugen die Nutzungsphase der dominierende Treiber des Energiebedarfs darstellt, wobei mit zunehmender Elektrifizierung der Speicher eine stärkere Rolle einnimmt. Bei Mischantrieben wird eine entsprechende Abschwächung dieser Effekte beobachten, wobei auch hier der Fahrenergiebedarf den größten Posten einnimmt, wenn auch nicht so dominant wie beim rein konventionellen Antrieb.

3.3.6 Zusammenfassung der technischen Betrachtung

Abbildung 61 zeigt den Primärenergiebedarf verschiedener Fahrzeugantriebe und -segmente einer privaten Nutzung für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040.Es lassen sich die zuvor diskutierten Zusammenhänge erkennen und wie folgt zusammenfassen:

- Der kumulierte Primärenergiebedarf steigt mit der Fahrzeuggröße und -masse für alle Antriebe auf Grund steigender Energiebedarfe sowohl bei der Herstellung als auch in der Nutzungsphase. Die Differenz zwischen einem Kleinwagen und einem SUV liegen je nach Antrieb in 2020 zwischen 41% und 103%, in 2040 zwischen 56% und 98%
- Für das Jahr 2030 wird eine Reduzierung der Primärenergiebedarfe bei Antrieben, welche flüssige oder gasförmige Kraftstoffe nutzen, prognostiziert, welche auf Wirkungsgradsteigerungen an den betrachteten Verbrennungsmotoren zurückzuführen ist. In 2040 steigt der Primärenergiebedarf an, da der Anteil energieintensiver biogener und synthetischer Kraftstoffe mit dem Ziel der Dekarbonisierung zunimmt.
- Konventionelle und mild-hybridisierte Fahrzeuge sowie Fahrzeuge mit Gasantrieben weisen für alle Fahrzeugsegmente und Anschaffungsjahre die größten kumulierten Primärenergiebedarfe auf.
- Batterieelektrische Fahrzeuge weisen in allen Fahrzeugsegmenten und für alle Anschaffungsjahre die geringsten Primärenergiebedarfe auf. Dies ist insbesondere auf den hohen Wirkungsgrad des Antriebs sowie bei der Stromherstellung zurückzuführen.
- Brennstoffzellenfahrzeuge liegen aus energetischer Sicht in den Jahren 2030 und 2040 nur leicht höher als Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge.

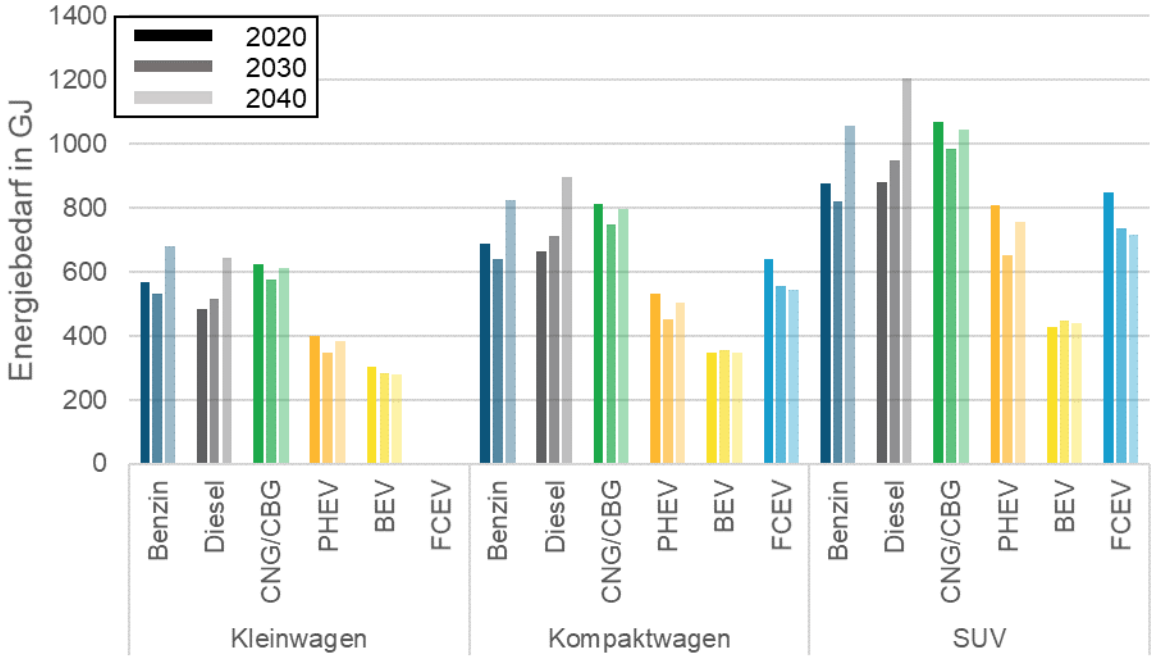


Abbildung 61 – Kumulierter Primärenergiebedarf verschiedener Antriebe und Fahrzeugsegmente in privater Nutzung für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040

3.4 Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz

Die zuvor gezeigten Ergebnisse stellen die kumulierten THG-Emissionen, Kosten und Primärenergiebedarfe verschiedener Fahrzeugantriebe in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments, des Anschaffungsjahres sowie der Hybridisierung dar. Im Folgenden soll als Entscheidungshilfe eine kombinierte Effizienz abgeleitet werden, welche die drei bisher separat analysierten Aspekte zusammenfassen. Es wird dafür eine Darstellung gewählt, welche die pro betrachteten Aspekt zurücklegbaren Kilometer darstellt, also eine Wirkungsgradbetrachtung, in welcher der Nutzen zum jeweiligen Aufwand bewertet wird. Um die verschiedenen zahlenmäßigen Größenordnungen von €, tausenden MJ sowie kg CO_2 in einer geeigneten Darstellung abbilden zu können, wurde eine Skalierung und Normierung vorgenommen, welche den folgenden Darstellungen jeweils angefügt ist. Eine stärkere Ausprägung eines Aspekts bedeutet, dass dieser durch den Antrieb gut erfüllt wird. Der Benzin- und der Dieselantrieb sind aufgrund der auf gleichem Niveau liegenden Ergebnisse zusammengefasst.

Segmentvergleich für einen Privatnutzer im Anschaffungsjahr 2020

Abbildung 62 zeigt die kombinierte Effizienz der in dieser Studie betrachteten Fahrzeugantriebe für einen Privatnutzer in den drei Fahrzeugsegmenten für das Anschaffungsjahr 2020. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass das batterieelektrische Fahrzeug in allen drei Segmenten hinsichtlich des Primärenergiebedarfs die höchste Effizienz liefert. Dies ist im Wesentlichen auf den hohen Wirkungsgrad des Antriebs und der Energieträgerherstellung zurückzuführen. Bezüglich der THG-Emissionen und der Kosten bietet das batterieelektrische Fahrzeug ebenfalls eine hohe Effizienz und stellt im Kleinwagensegment und in der Kompaktwagenklasse die effizienteste Lösung dar, wobei in der SUV-Klasse Benzin und Gasfahrzeuge eine etwas bessere ökonomische Bilanz aufweisen können. Der Gas-Antrieb schneidet ökologisch und ökonomisch sehr gut ab und liegt auf ähnlichem bzw. gleichem Niveau wie der batterieelektrische Antrieb.

Ein großer Unterschied zwischen den beiden Antrieben liegt in der technischen Effizienz. So hat der Gas-Antrieb je nach Segment einen 2-2,5-fachen Primärenergiebedarf. Plug-In Hybride schneiden je nach Segment unterschiedlich ab. Je größer und schwerer das Fahrzeug wird, desto ineffizienter wird diese Antriebsvariante aus ökologischer, ökonomisch er und technischer Perspektive im absolut und im Vergleich zu den anderen Antriebsoptionen. Bezüglich der Gesamtemissionen ist vor allem das Benzin-angetriebene Fahrzeug im Jahr 2020 kritisch zu sehen, bildet es doch in allen drei Segmenten das Schlusslicht. Brennstoffzellen bieten in allen Aspekten zum heutigen Stand weder aus ökologisch-technischer noch aus ökonomischer Sicht eine effiziente Alternative.

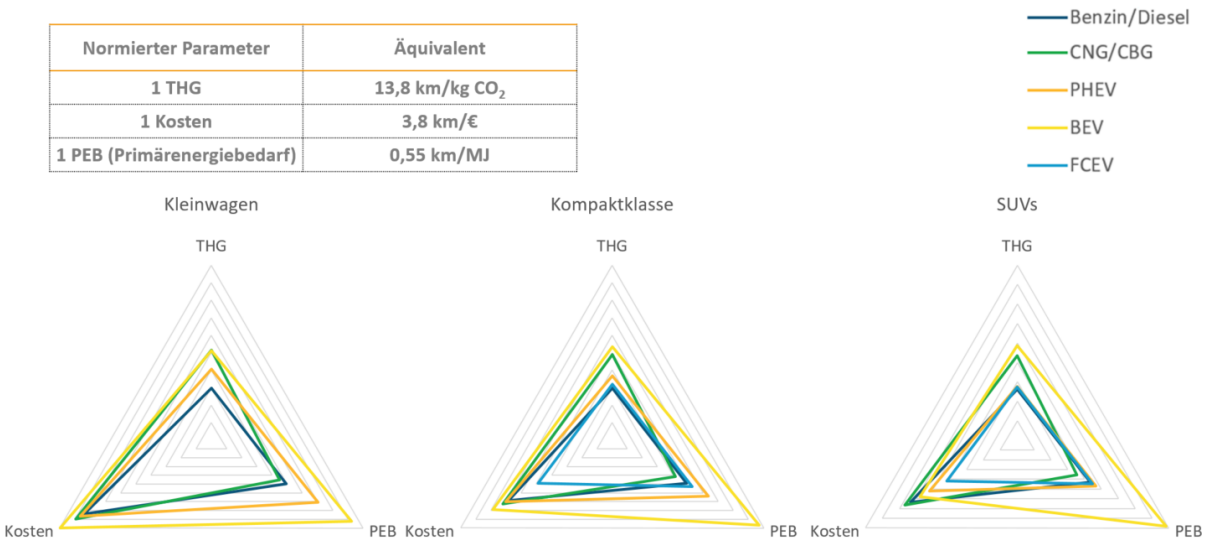


Abbildung 62 - Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz verschiedener Fahrzeugantriebe für verschiedene Fahrzeugsegmente in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020

Jahresvergleich Kompaktwagen in privater Nutzung

Abbildung 63 zeigt die kombinierte Effizienz verschiedener Fahrzeugantriebe eines Fahrzeuges der Kompaktwagenklasse in Privatnutzung für die Anschaffungszeitpunkte 2020 und 2040. Für das Anschaffungsjahr 2020 wurden Ergebnisse bereits zuvor diskutiert. Der Vergleich mit dem Anschaffungsjahr 2040 zeigt, dass alle Antriebe bezüglich der THG-Emissionen eine deutliche Verbesserung zeigen. Dabei liegen batterieelektrische, CNG-/CBG-Fahrzeuge sowie Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb auf einem ähnlichen Level, was sich auf eine starke Dekarbonisierung der Strom-, Gas- sowie Wasserstoffherstellung zurückführen lässt. Die mildhybridisierten Benzin- und Dieselfahrzeuge sind ökologisch deutlich ineffizienter. Dieses Verhalten ist auf den im Vergleich zu BEV und FCEV geringen Antriebswirkungsgrad zum einen sowie dem vorhanden fossilen Anteil am verwendeten Kraftstoffmix zum anderen zurückzuführen. Die nur leicht hybridisierten und die CNG-/CBG-Fahrzeuge weisen auch in 2040 eine signifikant geringere technische Effizienz auf als hoch elektrifizierte Antriebe wie Brennstoffzellen-, Plug-In- oder batterieelektrische Fahrzeuge. Bezüglich des Primärenergiebedarfs weist das batterieelektrische Fahrzeug auf Grund des hohen Antriebswirkungsgrades sowie des vergleichsweise geringen Energiebedarfs bei der Stromherstellung die höchste Effizienz unter den betrachteten Antriebsalternativen auf. Auch in der ökonomischen Betrachtungsweise stellt sich das batterieelektrische Fahrzeug als die effizienteste Alternative dar, wobei hier der Abstand zu den übrigen Antrieben deutlich kleiner ausfällt. Aufgrund der hohen Herstellungs- bzw.

Anschaffungskosten bilden Brennstoffzellenfahrzeuge hier die ineffizienteste Option. CNG- und Fahrzeugen mit leichter Elektrifizierung und Plug-in-Hybride liegen auf gleichem Niveau. Diese Fahrzeuge weisen auf Grund ihres vergleichsweise geringen Antriebswirkungsgrades hohe Kosten in der Nutzungsphase, vor allem Kraftstoffkosten, auf. Zusammenfassend lässt sich erkennen, dass das batterieelektrische Fahrzeug für einen Kompaktwagen in privater Nutzung sowohl in 2020 als auch zukünftig die ökologisch, technisch und ökonomisch effizienteste Option darstellt.

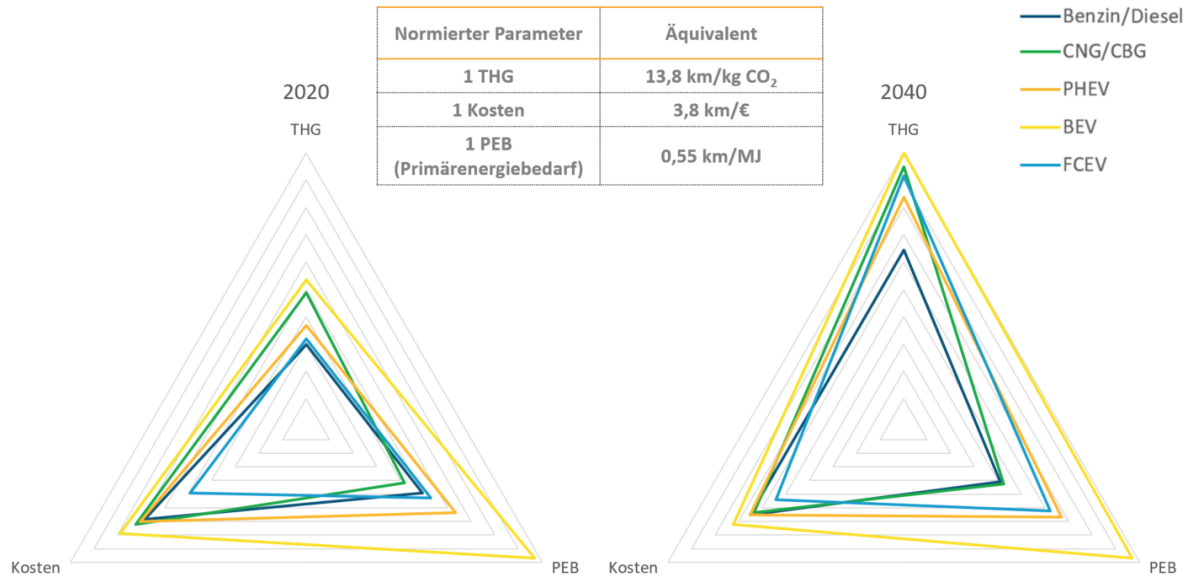


Abbildung 63 - Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz verschiedener Fahrzeugantriebe für einen Kompaktwagen in privater Nutzung für verschiedene Anschaffungszeitpunkte

Segmentvergleich Privatnutzung für das Anschaffungsjahr 2040

Abbildung 64 zeigt die kombinierte Effizienz verschiedener Fahrzeugantriebe eines Kleinwagens und eines SUVs in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2040. Es lässt sich grundsätzlich erkennen, dass die kombinierte Effizienz eines Fahrzeuges aus der Kleinwagenklasse signifikant über der des Fahrzeuges aus dem SUV-Segment liegt. Dieser Zusammenhang gilt unabhängig vom Antrieb. Aufgrund der hohen Fahrzeugmasse und der Fahrzeuggröße, weist der SUV einen hohen Energiebedarf sowohl in der Herstellung als auch in der Nutzungsphase auf. Darüber hinaus wird der SUV mit einer höheren Gesamtfahrleistung genutzt. Dies wirkt sich auf den Primärenergiebedarf, die Treibhausgasemissionen sowie die Gesamtkosten aus, welche beim SUV allesamt höher sind als beim Kleinwagen. Insbesondere die ökonomische Effizienz eines großen Fahrzeuges liegt antriebs-unabhängig deutlich unter der des Fahrzeuges aus der Kleinwagenklasse. lässt sich zudem erkennen, dass die kombinierte Effizienz der Plug-in-Hybride mit größeren Batterien und höheren elektrischen Fahranteilen in Zukunft sehr gut ausfallen kann, mit steigender Fahrzeuggröße allerdings auch stark abnimmt.

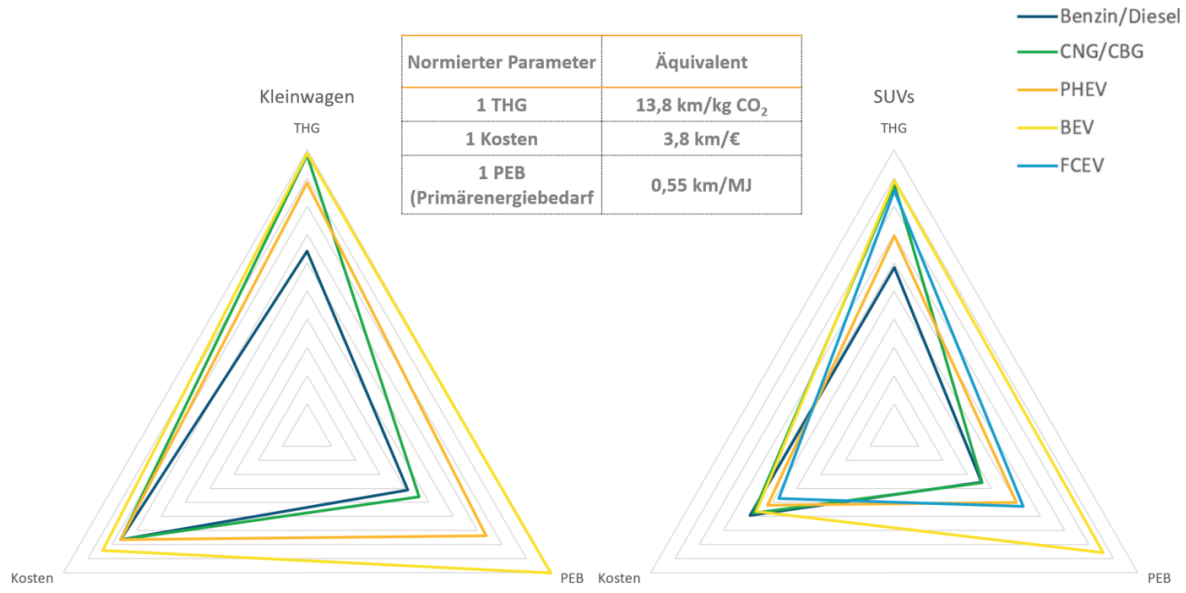


Abbildung 64 - Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz verschiedener Fahrzeugantriebe für ein Fahrzeug aus der Kleinwagenklasse und ein Fahrzeug aus der SUV-Klasse in privater Nutzung für den Anschaffungszeitpunkt 2040

Zusammenfassung zum Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz

Der Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz der hier betrachteten Fahrzeugantriebe kann wie folgt zusammengefasst werden: Batterieelektrische Fahrzeuge bieten sowohl bezüglich der ökologisch-technischen Aspekte der Treibhausgasemissionen und des Primärenergiebedarfs in jedem Segment und für die betrachteten Anschaffungszeitpunkte die beste Alternative. Bzgl. der ökonomischen Effizienz ist dies vom Zeitpunkt und des Segments abhängig. Dies ist durch den hohen Wirkungsgrad des Antriebs und den damit verbundenen geringen THG-Emissionen sowie einem geringen Primärenergiebedarf in der Nutzungsphase zu erklären. Zudem fällt auch die Herstellung des Energieträgers vergleichsweise ökologisch, technisch und ökonomisch effizient aus. Gasahrzeuge stellen ebenfalls eine effiziente Lösung dar. Diese profitieren vor allem von vergleichsweise geringen Anschaffungskosten sowie geringen Kraftstoffkosten und einem niedrigen Emissionsfaktor des Energieträgers vor allem auf Grund hoher biogener Kraftstoffanteile. Dem steht jedoch ein hoher Primärenergiebedarf bei der Kraftstoffherstellung gegenüber. Plug-In-Hybride können durch die kombinierte Nutzung von Strom und flüssigem Kraftstoff in der Nutzungsphase ihre Vorteile bzgl. THG-Emissionen und Energiekosten ausspielen und bilden damit ebenfalls eine je nach Segment nur geringfügig ineffizientere Alternative zu batterieelektrischen Fahrzeugen. Brennstoffzellenfahrzeuge sind in 2020 sowohl ökologisch, technisch als auch aus ökonomischer Sicht eine unterlegende Alternative. Dies ist insbesondere auf hohe Herstellungskosten aufgrund der Brennstoffzelle und Batterie sowie auf den hohen Primärenergiebedarf und einem großen THG-Abdruck der Energieträgerherstellung zurückzuführen. Mit zunehmender Dekarbonisierung der Wasserstoffherstellung wird sowohl der ökologische als auch der technische Nachteil in 2030 und 2040 geringer. Die hohen Systemkosten bleiben jedoch ein wesentlicher Kostentreiber in der Gesamtbilanz. Wie bereits zuvor gezeigt, nähern sich die Fahrzeugantriebe vor allem hinsichtlich der ökonomischen Effizienz zunehmend an. Aus ökologischer Perspektive werden alle Antriebe deutlich effizienter, allerdings unterschieden sich die Antriebe hierbei in 2040 je nach Segment noch um 53 % bis 68 %. Der größte Unterschied ist bei der technischen Effizienz zwischen den hauptsächlich mit dem

Verbrennungsmotor betriebenen Fahrzeugen, den Brennstoffzellenfahrzeugen und Plug-in-Hybriden und dem batterieelektrischen Fahrzeug zu erkennen.

4 Diskussion ausgewählter Aspekte

Hinsichtlich der Grundannahmen ist zu diskutieren, dass die im herangezogenen Energieszenario angenommene Verteilung bzw. Lenkung erneuerbarer Energieträger (synthetische und biogene Flüssig- und Gaskraftstoffe, Strom) die Ergebnisse stark prägen. So wird beispielsweise günstiger Biomasse im Pkw-Verkehr eine sehr große Rolle zugewiesen, wohingegen teure synthetische Energieträger nur in geringem Umfang zum Einsatz kommen. Eine Lenkung von günstiger Biomasse in andere Sektoren würde beispielsweise die TCO von Gasfahrzeugen sowie von ICEV durchaus verteuern und hätte auch entsprechende Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz. Gerade hinsichtlich des hohen Anteils von Bioethanol im Benzin (2050 bei 70%, also E70 statt wie bisher E5/E10) stellt sich zusätzlich die Frage inwieweit die Abwärtskompatibilität mit früheren Motorengenerationen im Bestand entsprechend gefährdet ist und ggf. teurere biogene „Drop-in Fuels“ notwendig würden. Dass Flex-Fuel Fahrzeuge (FFV) technologisch möglich sind, zeigt unter anderem Brasilien. Auch in Frankreich und Schweden wird E85 noch immer angeboten. In Deutschland konnten sich diese FFV in der Vergangenheit jedoch nie durchsetzen, vor allem auch aufgrund einer nicht verlängerten Steuerermäßigung. Neben unsicheren zusätzlichen nachhaltigen Biomassepotenzialen ist zum momentanen Zeitpunkt noch unklar, ob sich die Produktion von synthetischen Kraftstoffen in wenigen besonders geeigneten Ländern technisch, wirtschaftlich und vor allem politisch umsetzen lässt. Ebenso verliert auch der Ausbau von erneuerbaren Energien Anlagen für die Stromproduktion in Deutschland momentan an Schwung. Entsprechend ist nicht sicher, ob die angenommenen Potenziale der erneuerbaren Energieträger inkl. Strom und die entsprechenden Preispfade realisiert werden können.

Einen weiteren Punkt stellt die Pfadabhängigkeit der getroffenen Annahmen vom unterstellten Markthochlauf unterschiedlicher Antriebsalternativen im gewählten Energieszenario dar. Insbesondere BEVs und PHEVs spielen in diesem eine wichtige Rolle, womit Skalen- und Lerneffekte sowohl bei der Fahrzeugproduktion als auch beim Ladeinfrastrukturausbau möglich werden. Entsprechende Effekte treten bei FCEVs nur in sehr geringem Umfang auf, da auch in 2050 gemäß des gewählten Energieszenarios nur sehr wenige FCEVs im Bestand sein werden. Dies hat vor allem negativen Einfluss auf die Kosten bzw. Auslastung einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur.

Ein wichtiger zu diskutierender Aspekt ist die angenommene Nutzungsdauer und deren Einfluss auf die TCO. Für die Anschaffung eines Neuwagens aus Endkundenperspektive sind die angenommenen Haltedauern von 7 Jahren für Privatnutzer, 3 Jahren für Dienstwagennutzer und 5 Jahren für gewerblicher Nutzer in jedem Fall angemessen. Es zeigt sicher aber, dass nur etwas weniger als die Hälfte aller Autobesitzer tatsächlich einen Neuwagen besitzt (Statista 2021), was darauf hindeutet, dass die Anschaffung eines Neuwagens nicht zwingend den Standardfall darstellt. Zudem werden Pkw, wie in Kapitel 2.3.2 dargelegt wurde, insgesamt deutlich länger genutzt als die herangezogene Haltedauer. Zieht man statt der Haltedauer die gesamte Nutzungsdauer für die TCO-Berechnungen heran würden die Anschaffungskosten über einen deutlich längeren Zeitraum „amortisiert“ werden, bzw. der vor allem am Anfang hohe Wertverlust würde in Summe weniger schwer wiegen. Dies würde die Wirtschaftlichkeit von BEVs, PHEVs und nicht zuletzt FCEVs, mit ihren hohen Anschaffungskosten, deutlich verbessern. So könnten ggf. die genannten Antriebe 2020 auch ohne Subventionen eine wirtschaftliche Alternative darstellen.

Der Einfluss der Batteriekosten wurde bereits an mehreren Stellen andiskutiert. Hier ist festzuhalten, dass die Bestimmung der IST-Kosten in 2020 einen erheblichen Einfluss auf die weitere Kostenmodellierung hat.

Entsprechend der bereits diskutierten konservativen Kaufpreisabsenkung müssten die IST-Kosten in 2020 für diese Top5-Modelle entsprechend höher ausfallen um ein weiteres Angleichen der Kaufpreise zu modellieren. Gleichzeitig ist die Reichweitensteigerung von 2020 auf 2030 sowohl bei BEVs als auch bei PHEVs durchaus ambitioniert. Wie auch im entsprechenden Batterie-Szenario dargestellt zeigen die zukünftigen TCO von BEVs und PHEVs damit ein eher konservatives Bild. In Anbetracht langfristig zu erwartender Batteriekostenpotentialen, den dynamischen Entwicklungen bei Batterietechnologien (Feststoffbatterien, Lithium-Schwefel, Lithium-Luft) und OEM-übergreifenden Fahrzeugplattformen mit einer kosteneffizienten Großserienproduktion sind den kommenden Jahren durchaus deutlich niedrigere Anschaffungskosten und damit TCO denkbar, bei gleichzeitig zu erwartenden steigenden Kosten bei konventionellen Antrieben.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel dieser Studie war es mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse sowie einer Gesamtkostenrechnung aus Nutzersicht die ökologische, technische und ökonomische Effizienz verschiedener Antriebsformen und Kraftstoffe für Personenkraftwagen zu ermitteln. Das in dieser Studie zugrundeliegende Energieszenario verdeutlicht, dass eine starke Elektrifizierung der Pkw-Bestandsflotte notwendig ist, um die Klimaziele in 2030 und 2050 zu erreichen. Das batterieelektrische Fahrzeug weist im Jahr 2020 die mit Abstand höchste technische Effizienz (Gesamtwirkungsgrad) und zusammen mit dem Gasfahrzeug auch die höchste ökologische Effizienz bezüglich der Treibhausgase in allen betrachteten Segmenten und für alle Haltergruppen auf. Durch die staatliche Förderung von Elektrofahrzeugen in Form des Umweltbous/Innovationsprämie stellt der batterieelektrische Antrieb beim Kleinwagen und bei der Kompaktklasse auch den ökonomisch effizientesten Antrieb dar. Die aktuellen Fördermaßnahmen für rein batterieelektrische Elektrofahrzeuge erfüllen damit ihren Zweck, die aus Klimasicht vorteilhafteste Alternative ökonomisch auch für den Endverbraucher attraktiv zu machen. Bei den Plug-in-Hybriden entsteht eine ökologische Vorteilhaftigkeit und damit eine Rechtfertigung der Fördermaßnahmen nur, wenn ein relevanter Teil der Fahrleistung tatsächlich elektrisch zurückgelegt wird. Bei größeren und schwereren Fahrzeugen, hier berücksichtigt durch das Segment der SUVs, sind Fahrzeuge mit reinen Verbrennungsmotoren für den Endverbraucher jedoch weiterhin ökonomisch effizienter aufgrund der hohen Anschaffungspreise für die Batterien von Plug-in-Hybriden und rein batterieelektrischen Fahrzeugen. Hier sind für private und gewerbliche Halter demnach aus ökonomischer Perspektive Antriebe attraktiv, die ökologisch und technisch weniger effizient sind. Für Dienstwagenfahrer stellen batterieelektrische Fahrzeuge aufgrund der Dienstwagenregelung in Kombination mit der aktuellen Kaufpreissubvention in allen Segmenten die wirtschaftlichste Option für die Nutzer dar. Aufgrund der Vorteilhaftigkeit von batterieelektrischen Fahrzeugen in diesen beiden Effizienzen kann die Förderung des Markthochlaufs von batterieelektrischen Fahrzeugen durch die Bundesregierung in Form einer Kaufprämie für private und gewerbliche Halter (Umweltbonus bzw. Innovationsprämie) als sinnvoll erachtet werden. Mit den oben erwähnten Abstrichen gilt dies auch für Plug-in-Hybride. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Dienstwagenregelung ein wichtiges Instrument für die Diffusion ökologisch und technisch günstiger EVs darstellt.

In den weiterhin betrachteten Kaufzeitpunkten in 2030 und 2040 gleichen sich die unterschiedlichen Antriebsoptionen aus ökonomischer Perspektive stark an, trotz der Annahme auslaufender Subventionen für elektrische Fahrzeuge.

Beim Kleinwagen und der Kompaktklasse zeigt der batterieelektrische Antrieb unter den angenommenen Rahmenbedingungen weiterhin leichte Vorteile, lediglich in der Kompaktklasse in 2030 stellen FHEV und Gasfahrzeuge leicht wirtschaftlichere Optionen dar. Beim SUV haben Gas - und mildhybridisierte Benzinfahrzeuge in 2030 eine höhere und in 2040 eine leicht höhere ökonomische Effizienz. Brennstoffzellenfahrzeuge zeigen auch perspektivisch die geringste ökonomische Effizienz, wobei dies auch auf die im herangezogenen Energieszenario unterstellte geringe Verbreitung von Brennstoffzellenfahrzeugen zurückzuführen ist. Dies erhöht die Kosten für den Wasserstofftransport und die Wasserstofftankstellen, die auf die Fahrzeuge umgelegt werden, deutlich. Synergien bei gemeinsamer Nutzung der Infrastruktur mit wasserstoffbetriebenen schweren Nutzfahrzeugen sowie eine global aufgestellte und optimierte Wasserstoffwirtschaft könnten perspektivisch helfen, diese Kosten zu senken und die Nachfrage nach

Wasserstoff zu erhöhen. Dies wurde im Rahmen dieser Studie jedoch nicht weiter untersucht. Die Ergebnisse der Dienstwagenfahrer und gewerblichen Nutzer zeigen zudem, dass mit steigenden (elektrischen) Laufleistungen batterieelektrische Fahrzeuge und Plug-In-Hybride aufgrund niedriger Energie-, Wartungs- und Reparaturkosten immer wirtschaftlicher werden. Zudem sind weitere finanzielle Vorteile durch das Arbeitgeberladen möglich. So stellen bei Dienstwagen BEV in allen Segmenten und Kaufzeitpunkten die ökonomisch effizienteste Option dar. Bei Flottenfahrzeugen sind je nach Segment und Kaufzeitpunkt neben BEV auch Gasfahrzeuge und mildhybridisierte Benziner wirtschaftlich Vorteilhaft.

In dem Standardfall wird von deutlich steigenden Batteriekapazitäten ausgegangen. Eine Sensitivitätsrechnung (Szenario 1), zeigt zudem, dass mit konstanten Batteriegrößen und realen Reichweiten von ca. 300km BEV nochmals wirtschaftlicher werden und auch für SUVs eine wirtschaftlich interessante Option darstellen können.

Insgesamt, haben die politischen Rahmenbedingungen, wie aktuelle Kaufpreissubventionen und Fördermaßnahmen, Energiesteuer, CO_2-Abgabe sowie weitere Steuern und Abgaben einen großen Einfluss auf die ökonomische Effizienz, so dass hier zukünftige politische Entscheidungen auch zu anderen Ergebnissen führen können. Daher wurde dem Basisszenario ein Szenario ohne Umlagen (keine Umlagen auf Strom), Steuern (keine Mehrwert- bzw. Umsatzsteuer, keine CO_2-Steuer, keine Energiesteuer, keine Kfz-Steuer) und Subventionen (keine Kaufprämien, kein Dienstwagenvorteil) gegenübergestellt. Betrachtet man die ökonomische Effizienz ohne jegliche Steuern und Umlagen – allerdings auch ohne Internalisierung externer Kosten in Form von CO_2 sowie mit großen und demnach teureren Batterien – wie in Szenario 2 dargestellt, verändert sich das Bild deutlich: je nach Segment und Kaufzeitpunkt stellen (hybridisierte) Benzin-, Diesel und Gasfahrzeuge die wirtschaftlichsten Optionen dar. BEV und PHEV werden in diesem Szenario erst in 2040 zu einer wirtschaftlichen Alternative.

Mit Blick auf die Treibhausgasbilanz für den Kaufzeitpunkt in 2030 bzw. 2040 kann die Verbesserung des deutschen Strommixes, der Import von aus erneuerbaren Energien produzierter synthetischer Kraftstoffe und der hohe Einsatz von Biokraftstoffen zu einer deutlichen Verbesserung aller alternativen Kraftstoffe und Antriebsarten führen. Die batterieelektrischen, Gas- und Brennstoffzellenfahrzeuge zeigen dann die höchste Effizienz in allen Bereichen, während die mildhybridisierten Benzin-/Dieselfahrzeuge auch unter Nutzung synthetischer und biogener Kraftstoffe im Vergleich über alle betrachteten Aspekte deutlich ineffizienter abschneiden.

Bezüglich der technischen Effizienz stellt der batterieelektrische Antrieb die mit Abstand beste Lösung in allen drei Segmenten dar. Es folgen Plug-in-Hybride und Brennstoffzellenantriebe und mit nochmals deutlichem Abstand Benzin-, Diesel- und Gasfahrzeuge.

Die größte Differenz zwischen den verschiedenen Antriebsoptionen liegt somit auch in Zukunft beim Primärenergiebedarf. Dieser spielt bei der Kaufentscheidung bisher allerdings keine Rolle, da er bisher nicht eingepreist ist. Da erneuerbare Energien vor allem heute aber auch in Zukunft eine begrenzte Ressource darstellen, besteht hier ein Handlungs- bzw. Lenkungsbedarf der Politik, dieses Potenzial kosteneffizient zu nutzen. So gilt es auch die CO_2-Emissionen im Verkehrssektor bzw. im Pkw-Bereich kurz-, mittel- und langfristig, unter Einhaltung der Klimaziele in 2030 und 2050, kosteneffizient, zu reduzieren. Dies bezieht sich zum einen auf die unterschiedlichen Antriebsoptionen, zum anderen aber auch auf die Fahrzeugsegmente bzw. Fahrzeuggrößen.

Je größer das Fahrzeug, desto höher sind sowohl die CO_2 -Emissionen als auch der Primärenergiebedarf. Die aktuelle Förderung der besonders energieeffizienten batterieelektrischen Antriebe ist damit grundsätzlich

ein richtiger Schritt, um diese Lösungen auch für den Endkunden attraktiv zu machen. Die technischen und ökologischen Defizite großer Fahrzeugsegmente sowie konventioneller Antriebe sollten stärker adressiert werden (z.B. im Rahmen der Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung). Zusätzlich könnten die bestehenden Instrumente (z.B. Kfz-Steuer, Dienstwagenbesteuerung) genutzt werden um die Attraktivität von Fahrzeugsegmenten mit hoher ökologischer Effizienz – unabhängig von ihrem Antrieb – zu steigern. Zudem könnten mit Hilfe eines technologieoffenen Bonus-Malus-Systems, wie es im europäischen Ausland wie z.B. in Frankreich und den Niederlanden schon umgesetzt ist, ökologisch effiziente Fahrzeuge auch ökonomisch effizient bzw. attraktiv gestaltet sein.

6 Anhang

Batteriesystemkosten

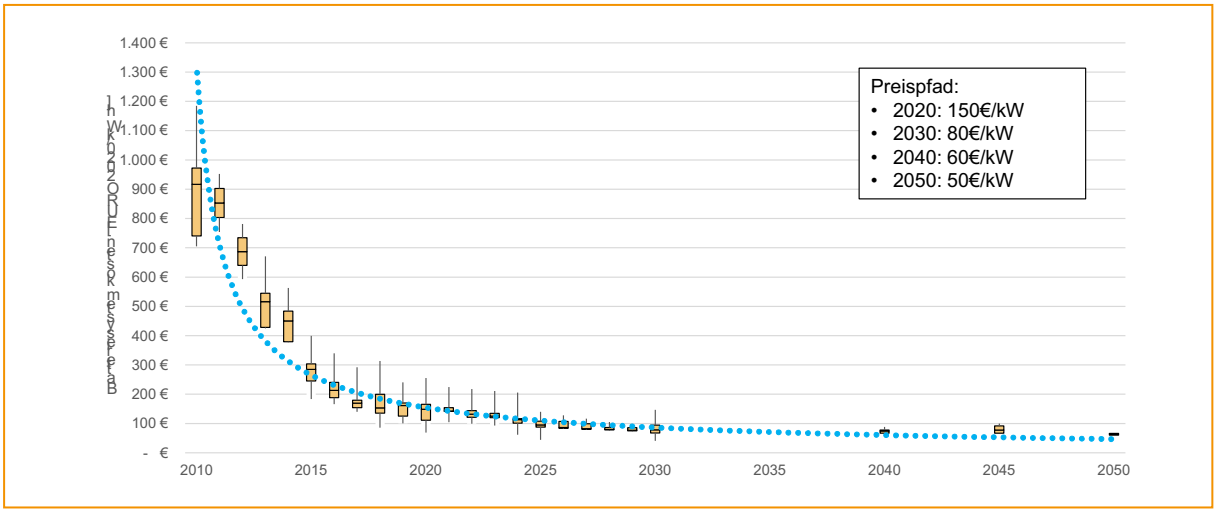


Abbildung 65 - Batteriesystemkosten. Quelle: Eigene Berechnung.

Verwendete Primärquellen (Auswahl Top7): (BNEF 2019), (Yole 2020), (VDI und VDE 2019), (Takeshita 2019b), (Thielmann et al. 2018), (eucar 2019), (NPM 2020b), etc.

Elektromotorkosten

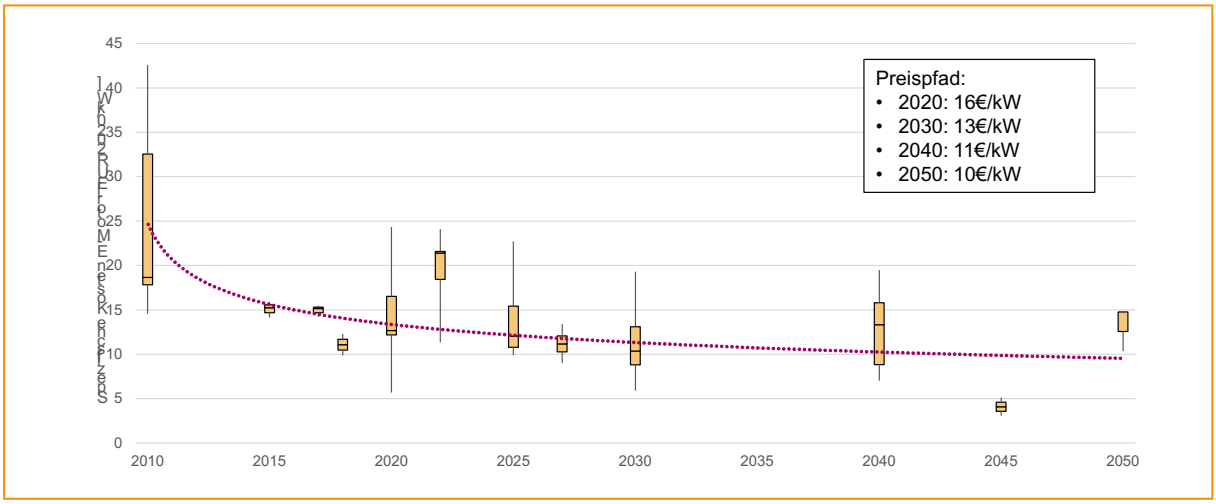


Abbildung 66 - Kosten Elektromotor. Quelle: Eigene Berechnung.

Verwendete Primärquellen (Auswahl Top7): (UBS 2017), (Fries et al. 2017), (Hoekstra et al. 2017), (Bubeck et al. 2016), (Hülsmann et al. 2014), (Ruffini und Wei 2018), (Ricardo 2015), etc.

Kosten Leistungselektronik, HV System

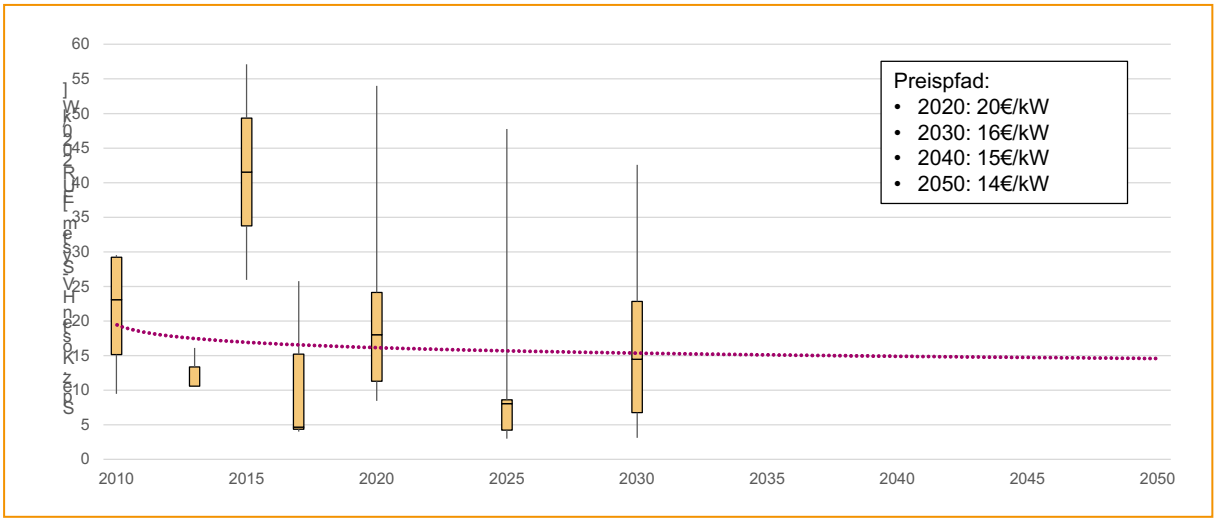


Abbildung 67 - Kosten Leistungselektronik, HV-System. Quelle: Eigene Berechnung.

Verwendete Primärquellen (Auswahl Top5): (Wolfram und Lutsey 2016), (Kleiner et al. 2015), (Özdemir 2012), (van Vliet 2010), (Hülsmann et al. 2014), (UBS 2017), (Fries et al. 2017), etc.

Brennstoffzellensystemkosten

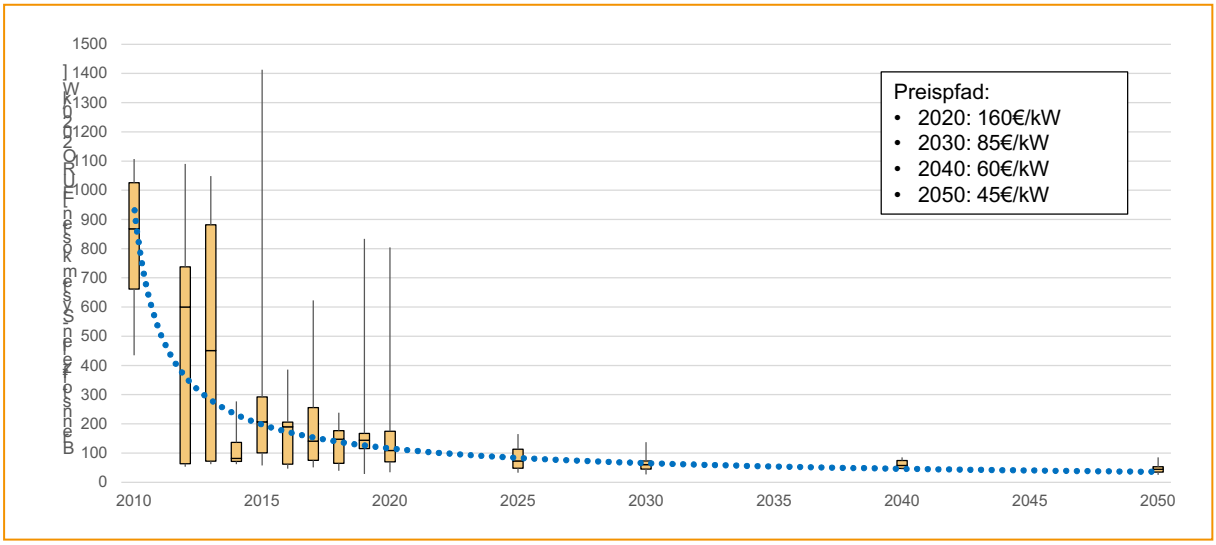


Abbildung 68 - Kosten Brennstoffzellensystem. Quelle: Eigene Berechnung.

Verwendete Primärquellen (Auswahl Top7): (Wolfram und Lutsey 2016), (DOE 2017), (Islam et al. 2020), (PNAS 2018), (IEA 2019a), (Öko-Institut e.V. 2019), (ICPC 2019), etc.

Wasserstofftankkosten

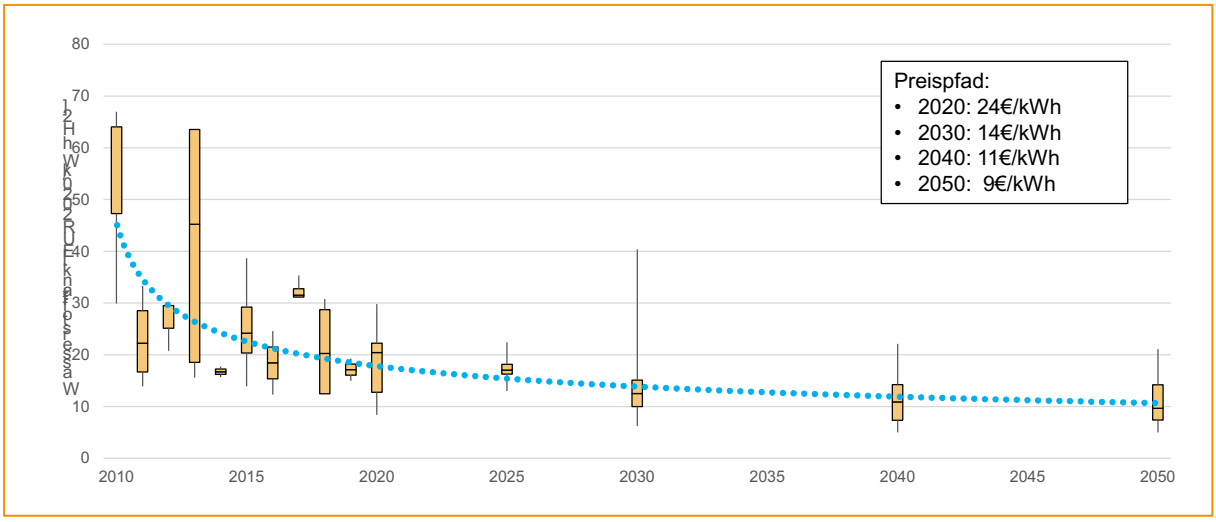


Abbildung 69 - Kosten Wasserstofftank. Quelle: Eigene Berechnung.

Verwendete Primärquellen (Auswahl Top7): (Kramer 2019), (NPM 2020b), (Öko-Institut e.V. 2019), (Ricardo 2015), (Burke 2020), (James 2018), (Ruffini und Wei 2018), etc.

Kaufpreise 2020

	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	18.720 €	29.420 €	33.240 €
Benzin	17.110 €	27.510 €	31.820 €
CNG	18.840 €	29.230 €	33.550 €
MHEV-Benzin	18.020 €	28.570 €	33.030 €
FHEV-Benzin	20.500 €	32.340 €	38.100 €
MHEV-Diesel	19.630 €	30.480 €	34.450 €
PHEV-Benzin	26.110 €	36.210 €	48.820 €
BEV	29.050 €	39.100 €	54.880 €
FCEV	- €	59.050 €	71.230 €

Tabelle 23 - Kaufpreise 2020

Kaufpreise 2030

	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	18.908 €	29.661 €	33.399 €
Benzin	17.804 €	28.167 €	32.433 €
CNG	19.370 €	29.712 €	33.990 €
MHEV-Benzin	18.636 €	29.137 €	33.554 €
FHEV-Benzin	20.080 €	31.569 €	36.959 €
MHEV-Diesel	19.755 €	30.636 €	34.498 €
PHEV-Benzin	25.001 €	35.405 €	48.499 €
BEV	27.079 €	37.244 €	53.633 €
FCEV	- €	47.685 €	59.047 €

Tabelle 24 - Kaufpreise 2030

Kaufpreise 2040

	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	19.506 €	30.267 €	33.958 €
Benzin	18.290 €	28.635 €	32.832 €
CNG	19.944 €	30.225 €	34.454 €
MHEV-Benzin	19.114 €	29.598 €	33.948 €
FHEV-Benzin	20.048 €	31.397 €	36.609 €
MHEV-Diesel	20.346 €	31.235 €	35.049 €
PHEV-Benzin	24.102 €	34.379 €	47.183 €
BEV	25.250 €	35.050 €	50.616 €
FCEV	- €	43.984 €	54.949 €

Tabelle 25 - Kaufpreise 2040

Versicherungspreise 2020 Privat

	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	444,86 €	516,03 €	649,94 €
Benzin	391,01 €	513,36 €	586,89 €
CNG	364,87 €	462,26 €	524,41 €
MHEV-Benzin	411,80 €	533,14 €	609,20 €
FHEV-Benzin	369,05 €	539,14 €	644,05 €
MHEV-Diesel	466,49 €	534,63 €	673,60 €
PHEV-Benzin	343,40 €	531,60 €	750,10 €
BEV	347,10 €	517,21 €	774,48 €
FCEV	- €	781,10 €	1.005,22 €
Absoluter Mittelwert:	**394,08 €**	**548,03 €**	**690,79 €**

Tabelle 26 - Versicherungspreise 2020 Privat

Versicherungspreise 2020 Dienstwagen

	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	582,24 €	686,18 €	888,67 €
Benzin	522,83 €	702,61 €	820,63 €
CNG	474,31 €	615,06 €	712,86 €
MHEV-Benzin	550,64 €	729,68 €	851,83 €
FHEV-Benzin	499,52 €	740,77 €	908,04 €
MHEV-Diesel	610,55 €	710,91 €	921,02 €
PHEV-Benzin	474,58 €	734,03 €	1.068,00 €
BEV	461,05 €	705,85 €	1.116,90 €
FCEV	- €	1.066,00 €	1.449,65 €
Absoluter Mittelwert:	**524,50 €**	**743,77 €**	**969,81 €**

Tabelle 27 - Versicherungspreise 2020 Dienstwagen

Versicherungspreise 2020 Flotte

	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	528,96 €	784,20 €	801,17 €
Benzin	471,65 €	803,69 €	735,61 €
CNG	434,28 €	714,07 €	648,56 €
MHEV-Benzin	496,74 €	834,66 €	763,58 €
FHEV-Benzin	448,10 €	850,23 €	817,06 €
MHEV-Diesel	554,68 €	812,45 €	830,33 €
PHEV-Benzin	421,69 €	846,08 €	965,30 €
BEV	424,09 €	817,68 €	1.051,19 €
FCEV	- €	1.234,89 €	1.364,36 €
Absoluter Mittelwert:	**474,57 €**	**855,46 €**	**884,41 €**

Tabelle 28 - Versicherungspreise 2020 Flotte

Kfz Steuer 2020

	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	161,00 €	230,00 €	295,00 €
Benzin	104,00 €	109,00 €	175,00 €
CNG	22,00 €	42,00 €	91,00 €
MHEV-Benzin	103,00 €	102,00 €	166,00 €
FHEV-Benzin	31,00 €	41,00 €	96,00 €
MHEV-Diesel	154,00 €	222,00 €	286,00 €
PHEV-Benzin	112,00 €	141,00 €	237,00 €
BEV	- €	- €	10,00 €
FCEV	- €	- €	- €

Tabelle 29 - Kfz Steuer 2020

Relative Restwerte Flotte 2020

	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	43,1%	35,7%	39,4%
Benzin	44,0%	36,1%	39,9%
CNG	43,4%	35,8%	39,6%
MHEV-Benzin	43,7%	35,9%	39,7%
FHEV-Benzin	42,1%	34,9%	38,4%
MHEV-Diesel	42,8%	35,5%	39,3%
PHEV-Benzin	40,9%	34,5%	38,0%
BEV	40,0%	33,9%	37,3%
FCEV		18,4%	32,3%
Rel. Mittelwert:	**42,4%**	**33,5%**	**38,2%**

Tabelle 30 - Relative Restwerte Flotte 2020

Relative Restwerte Private 2020

	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	31,4%	29,5%	28,6%
Benzin	32,3%	30,0%	29,0%
CNG	31,8%	29,7%	28,7%
MHEV-Benzin	32,0%	29,8%	28,8%
FHEV-Benzin	30,6%	28,7%	27,7%
MHEV-Diesel	31,2%	29,3%	28,5%
PHEV-Benzin	29,5%	28,4%	27,5%
BEV	28,8%	27,8%	27,0%
FCEV		28,5%	25,2%
Rel. Mittelwert:	**30,9%**	**29,0%**	**27,8%**

Tabelle 31 - Relative Restwerte Private 2020

Wartungskosten 2020 (2030/2040)

[EUR ct2020/km]	Kleinwagen (A/B)	Kompaktklasse (C)	SUV (J)
Diesel	4.49	5.09	5.88
Benzin	4.28	4.85	5.60
CNG	4.92	5.58	6.44
MHEV-Benzin	4.28	4.85	5.60
FHEV-Benzin	4.02	4.56	5.26
MHEV-Diesel	4.49	5.09	5.88
PHEV-Benzin	3.81 (3.08)	4.32 (3.49)	4.98 (4.03)
BEV	2.74	3.10	3.58
FCEV	3.64	4.12	4.76

Tabelle 32 - Wartungskosten 2020 (2030/2040)

Endverbraucherpreise Diesel, Benzin, Gas, Wasserstoff

	2020	2030	2040	2050
Diesel [€2020/l]	1,329	2,030	2,260	2,375
Benzin [€2020/l]	1,400	1,969	2,131	2,082
Gas [€2020/kg]	1,293	1,961	2,029	1,788
Wasserstoff [€2020/kg]	9,50	9,50	12,04	10,64

Tabelle 33 - Endverbraucherpreise Diesel, Benzin, Gas, Wasserstoff

Pt-L Gestehungskosten (MENA)

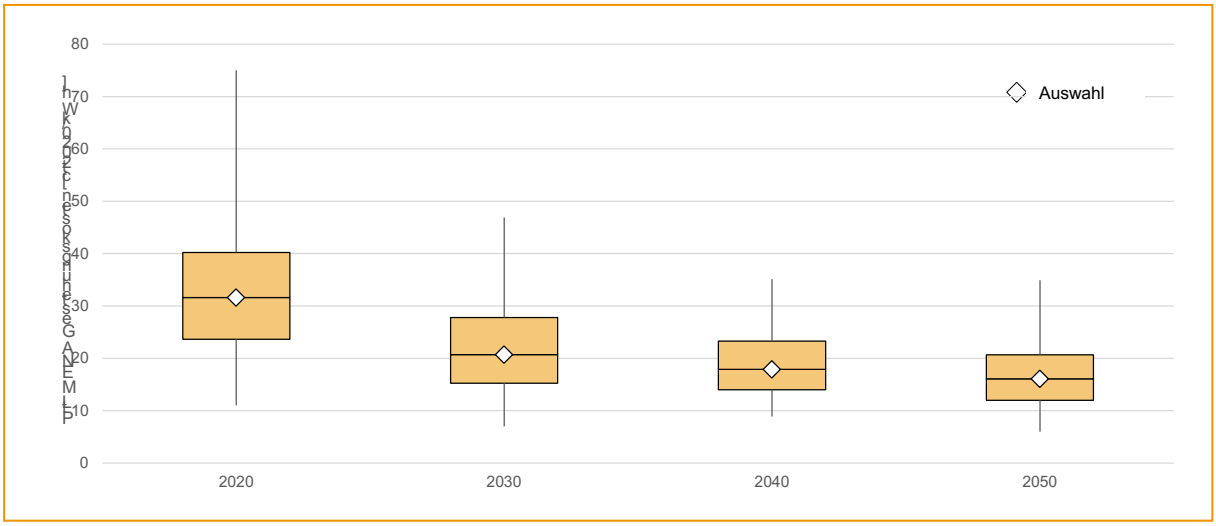


Abbildung 70 - Pt-L Gestehungskosten MENA Region. Quelle: Eigene Berechnung.

Pt-G Gestehungskosten (MENA)

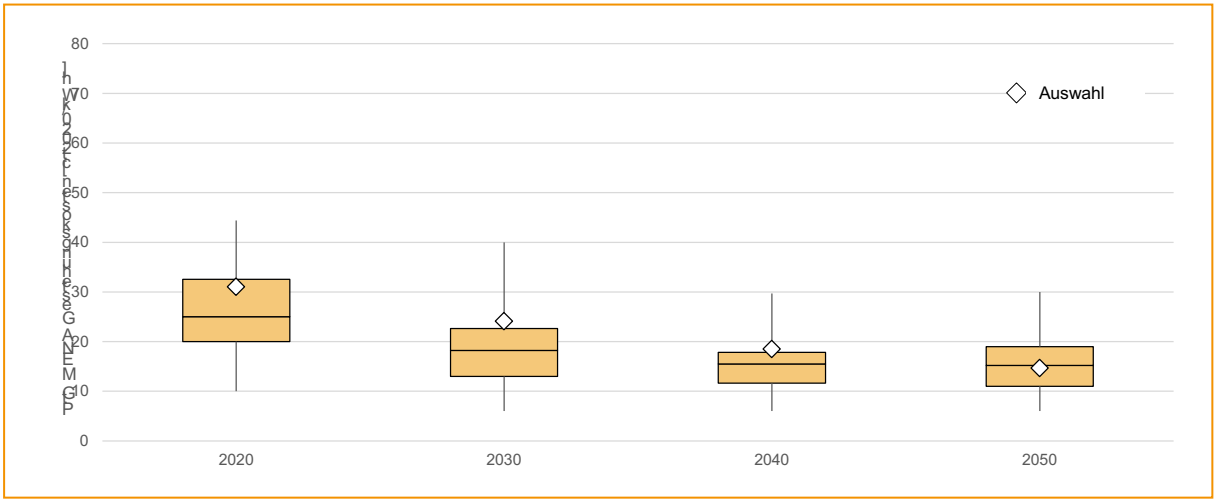


Abbildung 71 - Pt-G Gestehungskosten MENA Region. Quelle: Eigene Berechnung.

Pt-H2 Gestehungskosten (DE)

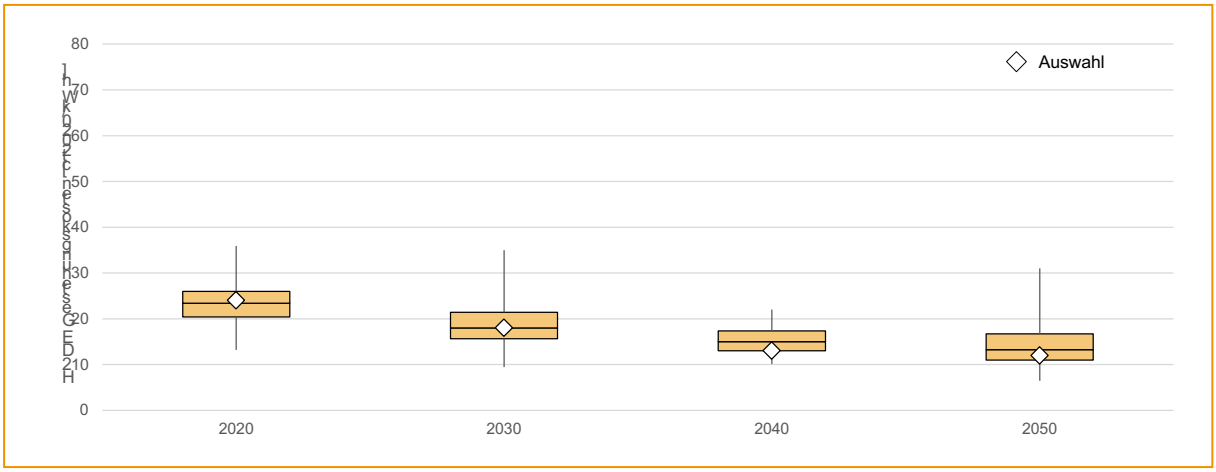


Abbildung 72 - Pt-H2 Gestehungskosten DE Region. Quelle: Eigene Berechnung.

Verwendete Primärquellen synthetische Kraftstoffe (Auswahl): (Prognos AG et al. 2021), (Prognos AG 2020a), (Soler Estralla 2020), (NPM 2020b), (Kramer 2019), (Perner et al. 2018), (Robinius et al. 2018), (dena 2018), (Fraunhofer ISI und DVGW 2018), (Fraunhofer IWES 2017), (Öko-Institut e.V. 2019), (Zapf et al. 2020), (Siegemund et al. 2017), etc.

Flüssige Biokraftstoffe Gestehungskosten (DE)

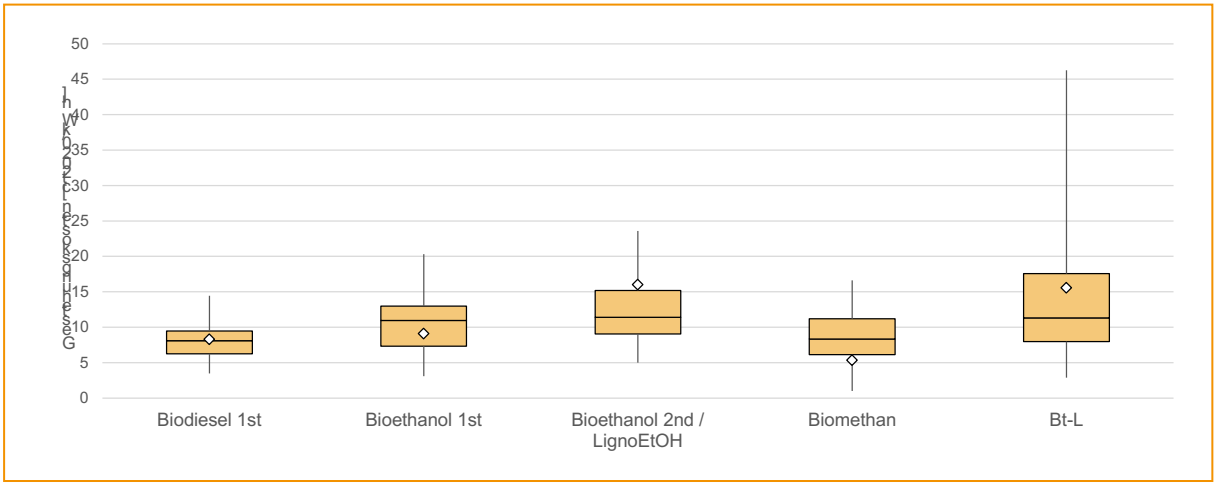


Abbildung 73 - Biokraftstoffe Gestehungskosten DE Region. Quelle: Eigene Berechnung.

Verwendete Primärquellen (Auswahl Top7): (Millinger 2018), (Wietschel et al. 2019), (Müller-Langer et al. 2014), (Festel et al. 2013), (Brown et al. 2020), (Haarlemmer et al. 2012) (Edel et al. 2019), etc.

Kostenbestandteile und Energiesteuern

Energiesteuern:

- Benzin: 47,04 ct/l
- Diesel: 65,45 ct/l
- Gas: 2020 bis 2023: 1,39 ct/kWh; Ab 2027: 3,18 ct/kWh
- Strom: 2,05 ct/kWh

Transportkosten nach Deutschland:

- Flüssige: 0,04 ct2020 / kWh
- Gasförmig: 1 ct2020 / kWh

Innerdeutsche Verteilung / Transport:

- Flüssige: 10 ct2020/kWh
- H2 (LKW Gasförmig): 2020: 4 ct2020/kWh; 2050: 3,5 ct2020/kWh
- Gasförmig: 1,56 ct2020/kWh (Konzessionsabgabe und Netzentgelt)

Margen und Deckungsbeiträge:

- Wagniskapital / Deckungsbeitrag Raffinerie: 0,6 EUR ct2020/kWh
- Marge Tankstelle: 1,5 EUR ct2020/kWh

Infrastruktur:

- Gastankstelle: 0,516 EUR ct2020/kWh
- H2-Tankstelle: 2020: 10 EUR ct2020/kWh: Ab 2040: 8 EUR ct2020/kWh

Sonstige:

- Verluste komprimieren: 0,5 ct2020/kWh
- Erdölbevorratung: 0,3 ct2020/l

Dienstwagenleasing Parameter

Parameter	Wert	Einheit
Durchschnittlicher Bruttolohn in Deutschland	3.994	EUR
Lohnsteuerklasse	1	-
Krankenversicherung (gesetzlich pflichtversichert)	15,5	%
Rentenversicherung (gesetzlich pflichtversichert)	18,6	%
Kirchensteuer	8,5	% auf LSt.
Arbeitslosenversicherung (gesetzlich pflichtversichert)	2,4	%
Pflegeversicherung (gesetzlich pflichtversichert)	3,3	%
Arbeitsweg	46	Km

Tabelle 34 - Dienstwagenleasing Parameter

Weitere Ergebnisse im Basisszenario

Kleinwagen - Flotte

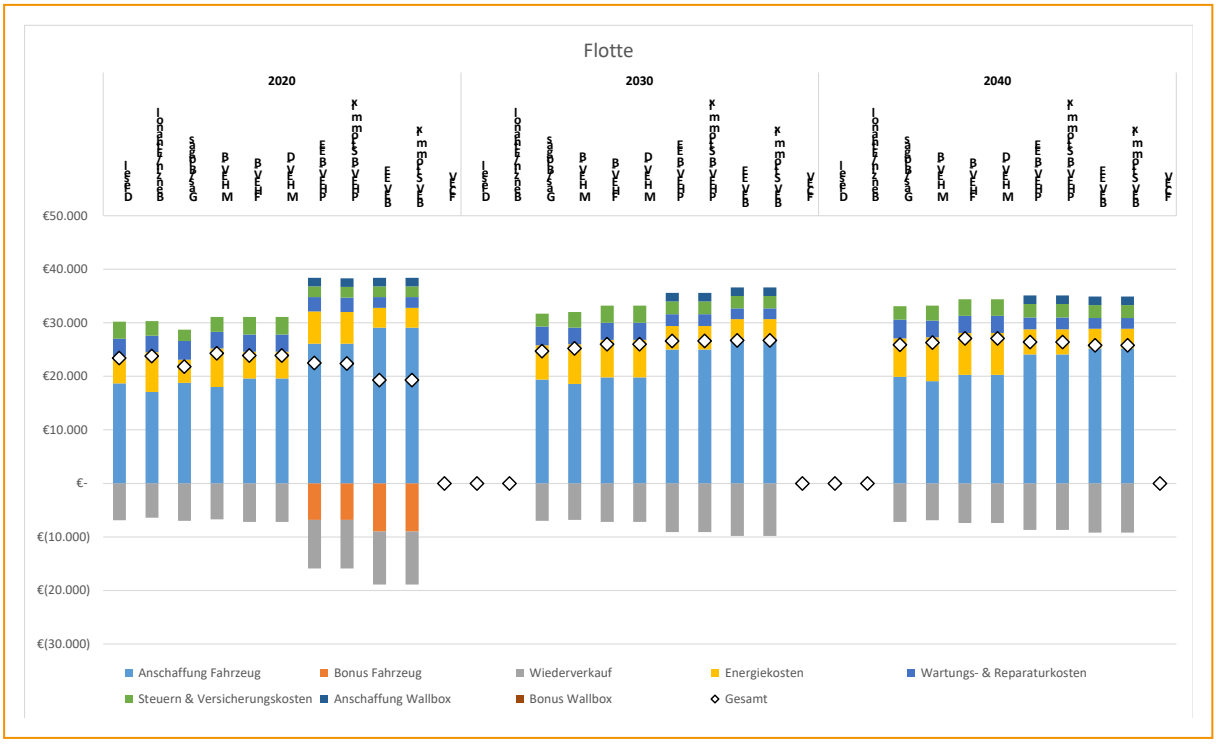


Abbildung 74 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von Kleinwagen - Flotte im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

SUV - Flotte

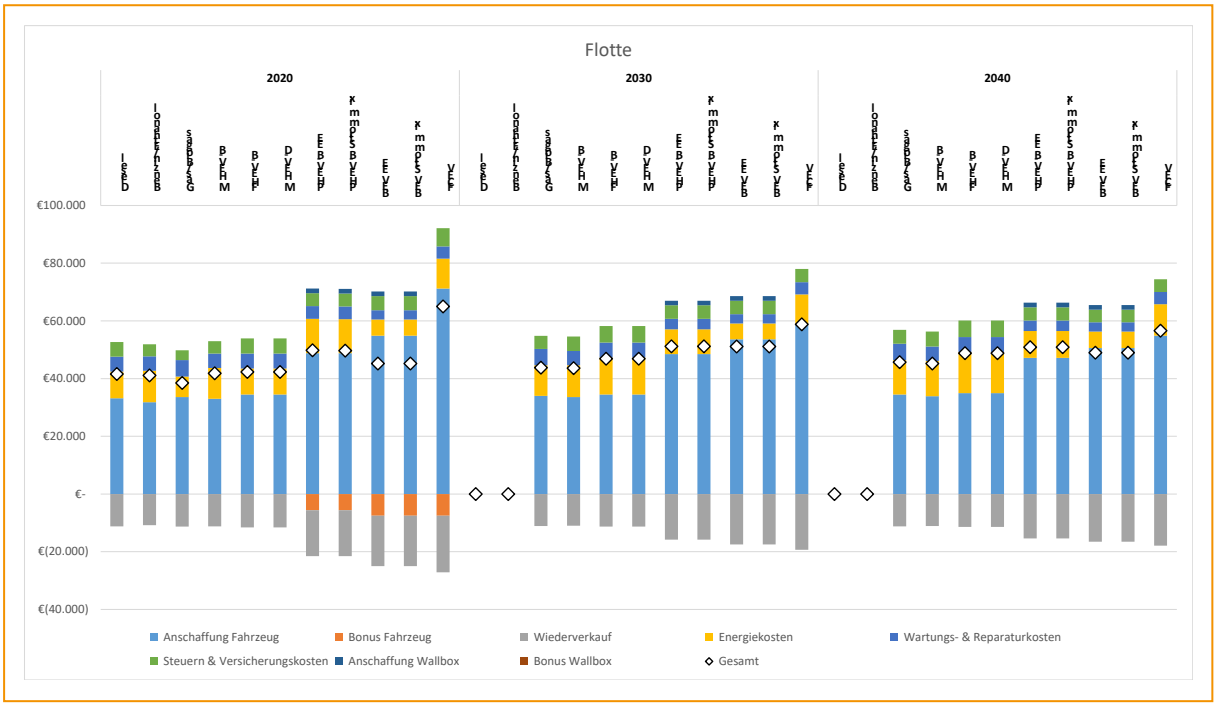


Abbildung 75 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von SUVs - Flotte im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

Kleinwagen - Dienstwagen

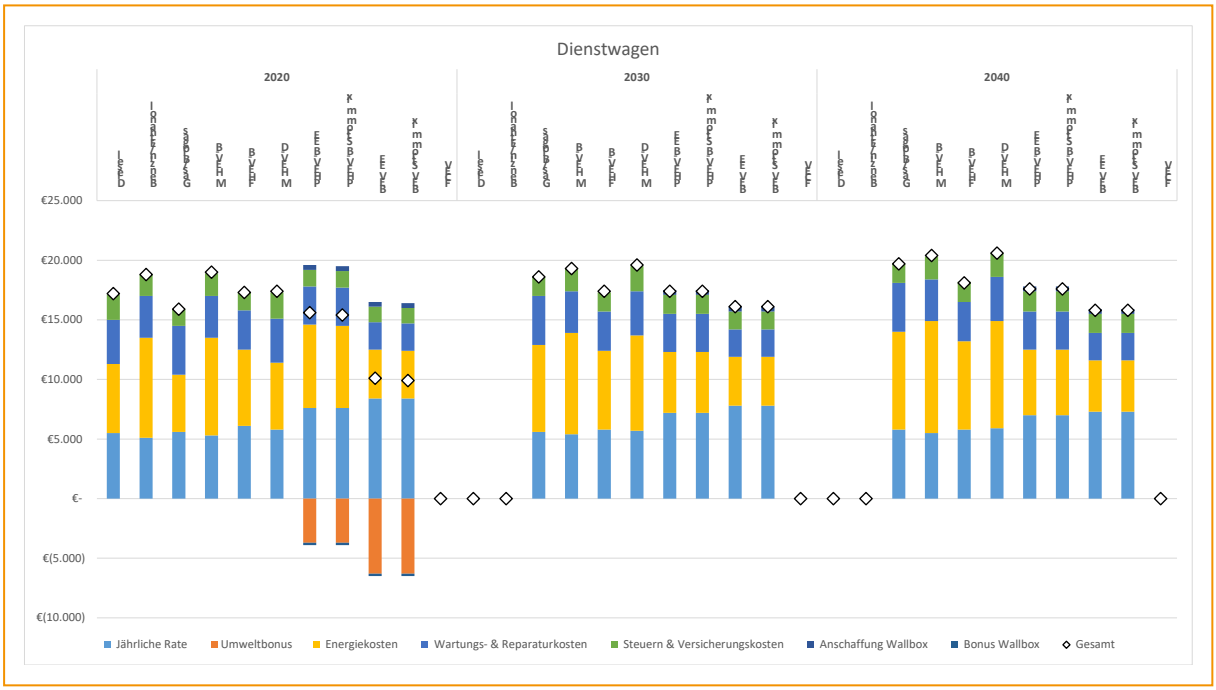


Abbildung 76 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von Kleinwagen - Dienstwagen im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

SUV - Dienstwagen

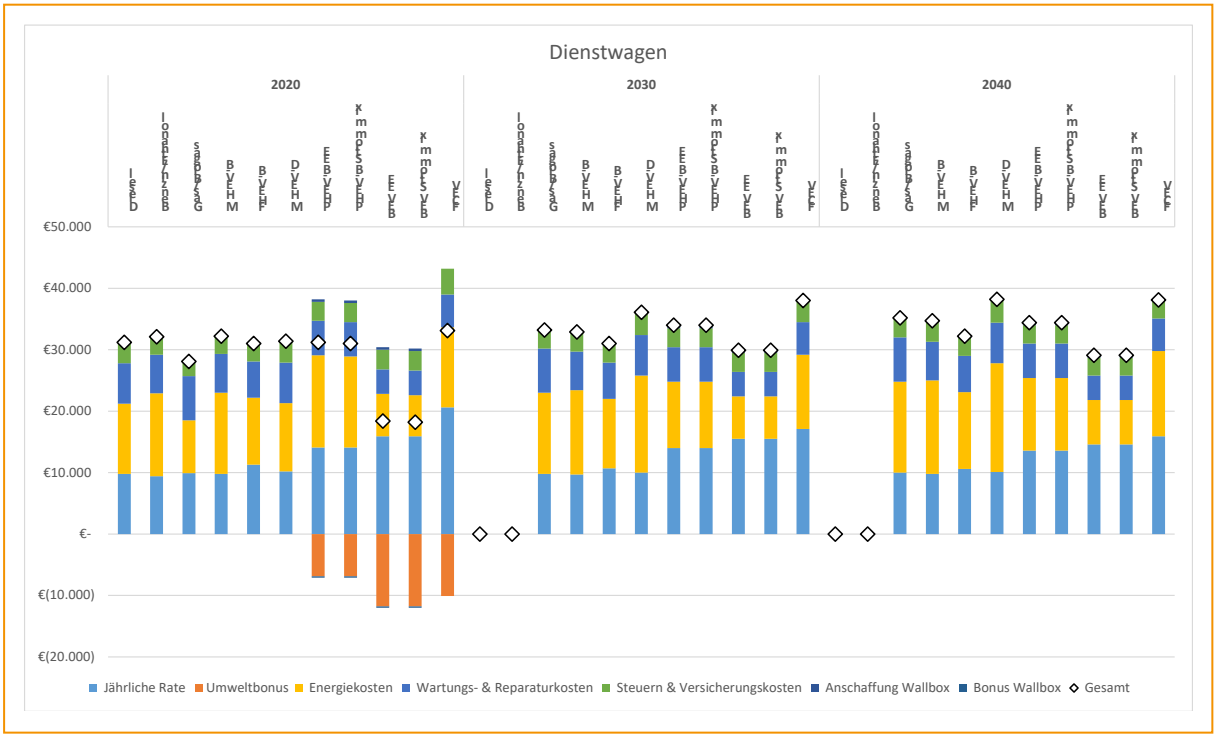


Abbildung 77 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von SUVs - Dienstwagen im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Lebenszyklusanalyse 9

Abbildung 2 - Verteilung der Ladeorte von EVs und unterschiedlichen Nutzertypen. Quelle: Eigene Auswertung auf Basis der Erhebung von Scherrer et al. (2019) 16

Abbildung 3 - Pkw-Bestand nach Antrieben. Quelle: Prognos AG et al. (2021) 18

Abbildung 4 - Mischungsquote von Biokraftstoffen erster und zweiter Generation. Quelle: Prognos AG et al. (2021) 19

Abbildung 5 - Beimischungsquoten erneuerbarer Energien bei Flüssigkraftstoffen. Quelle: Prognos AG et al. (2021) 20

Abbildung 6 - Beimischungsquoten erneuerbarer Energien bei Methan. Quelle: in Anlehnung an Prognos AG et al. (2021) 21

Abbildung 7 - Beimischungsquoten erneuerbarer Energien bei Wasserstoff. Quelle: Prognos AG et al. (2021) 22

Abbildung 8 - Entwicklung spezifischen CO_2-Emissionen von Strom im deutschen Strommix. Quelle: Prognos AG et al. (2021) 22

Abbildung 9 - Entwicklung der CO_2-Steuer. Quelle: in Anlehnung an Prognos AG et al. (2021) . 23

Abbildung 10 - Relativer Ladewirkungsgrad bei verschiedenen Ladeleistungen 26

Abbildung 11 - Entwicklung der elektrischen Reichweite sowie der Batteriekapazität bis zum Jahr 2030 für verschiedene Fahrzeugsegmente 27

Abbildung 12 - Realverbrauchsfaktor 29

Abbildung 13 - Anschaffungskosten der Antriebsalternativen 2020 in den verschiedenen Segmenten (Bruttolistenpreise bzw. Kaufpreise). Quelle: Eigene Berechnung 32

Abbildung 14 - Batteriesystemkosten im zeitlichen Verlauf. Quelle: Eigene Berechnung 34

Abbildung 15 - Brennstoffzellen-Systemkosten im zeitlichen Verlauf. Quelle: Eigene Berechnung 35

Abbildung 16 - Anschaffungskosten 2030. Quelle: Eigene Berechnung 37

Abbildung 17 - Übersicht relative Versicherungsprämie je Antrieb und je Nutzergruppe. Quelle: Eigene Berechnung 41

Abbildung 18 - Versicherungsprämien privater Halter. Quelle: Eigene Berechnung 41

Abbildung 19 - Relative Größenordnungen der Wartungskosten 2020. Quelle: Eigene Berechnung 44

Abbildung 20 - Wartungskosten je Segment und Antrieb im Jahr 2020. Quelle: Eigene Berechnung 44

Abbildung 21 - Schema für die Modellierung der Energieträgerkosten. Quelle: Eigene Berechnung 46

Abbildung 22 - Pt-L Gestehungskosten in der MENA-Region. Quelle: Eigene Berechnung 47

Abbildung 23 - Gestehungskosten Biomethan. Die grüne Linie zeigt die für diese Studie angenommene Referenz. Quelle: Eigene Berechnung 48

Abbildung 24 - Endverbraucherpreise Diesel, Benzin und Gas. Quelle: Eigene Berechnung 49

Abbildung 25 - Endverbraucherpreise Wasserstoff. Quelle: Eigene Berechnung 51

Abbildung 26 - Endverbraucherpreise Strom. Quelle: Eigene Berechnung 53

Abbildung 27 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von Kleinwagen - privat im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung. 66

Abbildung 28 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse - privat im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung. 67

Abbildung 29 - TCO in Abhängigkeit von der Fahrleistung verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse 2020 - privat im Basisszenario (die TCO von FCEV liegen deutlich oberhalb der Alternativen und sind deshalb in dieser Abbildung nicht dargestellt). Quelle: eigene Darstellung. 68

Abbildung 30 - TCO in Abhängigkeit von der Fahrleistung verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse 2030 - privat im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung. 68

Abbildung 31 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von SUVs - privat im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung 69

Abbildung 32 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse - Flotte im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung. 70

Abbildung 33 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe in der Kompaktklasse - Dienstwagen im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung. 71

Abbildung 34 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe über die Segmente hinweg in 2020, 2030 und 2040 und in privater Nutzung im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung. 72

Abbildung 35 - TCO-Ergebnisse Szenario 1: Beispiel privater Kompaktwagen. Quelle: Eigene Berechnung 74

Abbildung 36 - TCO-Ergebnisse Szenario 1: Beispiel privater SUV. Quelle: Eigene Berechnung 75

Abbildung 37 - TCO-Ergebnisse Szenario 2: Beispiel privater Kompaktwagen. Quelle: Eigene Berechnung 77

Abbildung 38 - TCO-Ergebnisse Szenario 2: Beispiel gewerblicher Kompaktwagen. Quelle: Eigene Berechnung 78

Abbildung 39 - TCO-Ergebnisse Szenario 2: Beispiel Kompaktwagen als Dienstwagen. Quelle: Eigene Berechnung 79

Abbildung 40 - TCO-Ergebnisse Szenario 2: Beispiel privater SUV. Quelle: Eigene Berechnung 80

Abbildung 41 - CO_2-Emissionen verschiedener Antriebe für einen Kompaktwagen und private Nutzer für das Anschaffungsjahr 2020 82

Abbildung 42 - Kumulierte THG-Emissionen für verschiedene Fahrzeugantriebe und -segmente für einen privaten Nutzer und das Anschaffungsjahr 2020 83

Abbildung 43 - THG-Emissionen ausgewählter Antriebe für verschiedene Anschaffungsjahre in der Kompaktwagenklasse und privatem Nutzer 84

Abbildung 44 - Kumulierte THG-Emissionen ausgewählter Antriebe für ein Fahrzeug der Kompaktwagenklasse und privater Nutzung für verschiedene Anschaffungsjahre 85

Abbildung 45 - THG-Emissionen eines Kompaktwagens mit verschiedenen Hybridisierungsgraden in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020 86

Abbildung 46 - Kumulierte THG-Emissionen eines Fahrzeuges der Kompaktwagenklasse in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020 und verschiedene Hybridisierungsgrade 87

Abbildung 47 - THG-Emissionen ausgewählter Antriebe eines Kompaktwagens für verschiedene Nutzertypen und das Anschaffungsjahr 2020 88

Abbildung 48 - Kumulierte THG-Emissionen ausgewählter Antriebe eines Fahrzeuges der Kompaktwagenklasse für eine Anschaffung in 2020 und verschiedene Nutzerklassen 89

Abbildung 49 - Kumulierte THG-Emissionen der Lebenszyklusabschnitte ausgewählter Fahrzeugantriebe eines Fahrzeuges der Kompaktwagenklasse in privater Nutzung für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040. 90

Abbildung 50 - THG-Emissionen über die Lebensdauer unterschiedlicher Fahrzeugklassen in privatem Gebrauch für verschiedene Anschaffungsjahre 92

Abbildung 51 - Primärenergiebedarf verschiedener Antriebsformen für ein Fahrzeug der Kompaktklasse in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020 93

Abbildung 52 - Kumulierter Primärenergiebedarf verschiedener Fahrzeugantriebe und -segmente in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020 94

Abbildung 53 - Fahrenergiebedarfe verschiedene Antriebe und Fahrzeugsegmente im Jahr 2020 95

Abbildung 54 - Primärenergiebedarf ausgewählter Antriebe in der Kompaktwagenklasse in der privaten Nutzung für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040 96

Abbildung 55 - Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe in der Kompaktwagenklasse und privater Nutzung für verschiedene Anschaffungsjahre 97

Abbildung 56 - Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe in der Kompaktwagenklasse und privater Nutzung für verschiedene Hybridisierungsgrade im Anschaffungsjahr 2020 98

Abbildung 57 - Kumulierter Primärenergiebedarf eine Kompaktwagens in privater Nutzung bei verschiedenen Hybridisierungsgraden im Anschaffungsjahr 2020 99

Abbildung 58 - Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe für ein Fahrzeug in der Kompaktwagenklasse im Anschaffungsjahr 2020 für verschiedene Nutzer 100

Abbildung 59 - Kumulierter Primärenergiebedarf ausgewählter Fahrzeugantriebe eines Fahrzeuges in der Kompaktwagenklasse im Anschaffungsjahr 2020 für verschiedene Nutzer 101

Abbildung 60 - Kumulierter Primärenergiebedarf der Lebenszyklusabschnitte ausgewählter Antriebe für einen Kompaktwagen in privater Nutzung für verschiedene Anschaffungsjahre 102

Abbildung 61 – Kumulierter Primärenergiebedarf verschiedener Antriebe und Fahrzeugsegmente in privater Nutzung für die Anschaffungsjahre 2020, 2030 und 2040 104

Abbildung 62 - Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz verschiedener Fahrzeugantriebe für verschiedene Fahrzeugsegmente in privater Nutzung für das Anschaffungsjahr 2020 105

Abbildung 63 - Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz verschiedener Fahrzeugantriebe für einen Kompaktwagen in privater Nutzung für verschiedene Anschaffungszeitpunkte 106

Abbildung 64 - Vergleich der ökonomischen, ökologischen und technischen Effizienz verschiedener Fahrzeugantriebe für ein Fahrzeug aus der Kleinwagenklasse und ein Fahrzeug aus der SUV-Klasse in privater Nutzung für den Anschaffungszeitpunkt 2040 107

Abbildung 65 - Batteriesystemkosten. Quelle: Eigene Berechnung. 114

Abbildung 66 - Kosten Elektromotor. Quelle: Eigene Berechnung. 114

Abbildung 67 - Kosten Leistungselektronik, HV-System. Quelle: Eigene Berechnung. 115

Abbildung 68 - Kosten Brennstoffzellensystem. Quelle: Eigene Berechnung. 115

Abbildung 69 - Kosten Wasserstofftank. Quelle: Eigene Berechnung. 116

Abbildung 70 - Pt-L Gestehungskosten MENA Region. Quelle: Eigene Berechnung. 122

Abbildung 71 - Pt-G Gestehungskosten MENA Region. Quelle: Eigene Berechnung. 122

Abbildung 72 - Pt-H2 Gestehungskosten DE Region. Quelle: Eigene Berechnung. 123

Abbildung 73 - Biokraftstoffe Gestehungskosten DE Region. Quelle: Eigene Berechnung.....123

Abbildung 74 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von Kleinwagen - Flotte im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.....125

Abbildung 75 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von SUVs - Flotte im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.....125

Abbildung 76 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von Kleinwagen - Dienstwagen im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.....126

Abbildung 77 - TCO verschiedener Antriebsalternativen und Kraftstoffe von SUVs - Dienstwagen im Basisszenario. Quelle: eigene Darstellung.....126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Parameter der TCO-Berechnung sowie deren Abkürzungen und Einheiten. 11

Tabelle 2 - Jahresfahrleistung , Lebensdauer und Nutzungsdauer verschiedener Nutzertypen und Fahrzeugsegmente 14

Tabelle 3 - Energiebedarfe im Pkw-Verkehr. Quelle: Prognos AG et al. (2021). 18

Tabelle 4 - Verteilung der Energiequellen von Flüssigkraftstoffen in Petajoule. Quelle: Prognos AG et al. (2021). 20

Tabelle 5 - Verteilung der Energiequellen von Methan in Petajoule. Quelle: in Anlehnung an Prognos AG et al. (2021) 21

Tabelle 6 - Entwicklung des Wasserstoffbedarfs im Pkw-Verkehr. Quelle: Prognos AG et al. (2021). 22

Tabelle 7 - Referenzfahrzeuge und Antriebe 24

Tabelle 8 - Realverbrauchsfaktor für verschiedene Antriebsformen 26

Tabelle 9 - Wirkungsgradveränderungen verschiedener Antrieb von 2020 bis 2030 28

Tabelle 10 - Inflationsrate in Deutschland von 2015 bis 2050 (Veränderung des Verbraucherpreisindex gegenüber Vorjahr). Quelle: Destatis (2021); Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (2020). 30

Tabelle 11 - Parameter für die Restwertberechnung 38

Tabelle 12 - Anschaffungskosten Ladeinfrastruktur 39

Tabelle 13 - Übersicht der betrachteten Kraftstoffe und Gestehungspfade 45

Tabelle 14 - Übersicht Preiskorridore für öffentliches Laden. Quelle: Eigene Berechnung 53

Tabelle 15 - CO_2-äquivalente Emissionen bei der Herstellung verschiedener Fahrzeugantriebe in verschiedenen Fahrzeugsegmenten an den Betrachtungszeitpunkten 2020, 2030 und 2050 55

Tabelle 16 - CO_2-äquivalente Emissionen bei der Herstellung verschiedener Energieträger an den Betrachtungszeitpunkten 2020, 2030 und 2050 57

Tabelle 17 - CO_2-äquivalente Emissionen in gCO_2-äq. pro km für verschiedene Antriebe 57

Tabelle 18 - CO_2-äquivalente Emissionen bei der Entsorgung verschiedener Segment-Antriebskombinationen für die Betrachtungszeitpunkte 2020, 2030 und 2040 59

Tabelle 19 - Primärenergiebedarf für die Herstellung der betrachteten Segment-Antriebkombinationen für die Betrachtungszeitpunkte 2020, 2030 und 2040 . 60

Tabelle 20 - Primärenergiebedarf für die Herstellung verschiedener Energieträger an den Betrachtungszeitpunkten 2020, 2030 und 2040 62

Tabelle 21 - Primärenergiebedarf bei der Wartung verschiedener Fahrzeuge 63

Tabelle 22 - Primärenergiebedarf bei der Entsorgung verschiedener Fahrzeuge 64
Tabelle 23 - Kaufpreise 2020 116
Tabelle 24 - Kaufpreise 2030 117
Tabelle 25 - Kaufpreise 2040 117
Tabelle 26 - Versicherungspreise 2020 Privat 118
Tabelle 27 - Versicherungspreise 2020 Dienstwagen 118
Tabelle 28 - Versicherungspreise 2020 Flotte 119
Tabelle 29 - Kfz Steuer 2020 119
Tabelle 30 - Relative Restwerte Flotte 2020 120
Tabelle 31 - Relative Restwerte Private 2020 120
Tabelle 32 - Wartungskosten 2020 (2030/2040) 121
Tabelle 33 - Endverbraucherpreise Diesel, Benzin, Gas, Wasserstoff 121
Tabelle 34 - Dienstwagenleasing Parameter 124

Quelle ergänzen: Rose, P. (2020): Modeling a potential hydrogen refueling station network for fuel cell heavy-duty vehicles in Germany in 2050. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruhe.

Literaturverzeichnis

ADAC (2020a): ADAC Autokostenrechner 2020. Hg. v. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC). Online verfügbar unter https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/.

ADAC (2020b): Autokatalog. Online verfügbar unter https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/, zuletzt geprüft am 02.2021.

ADAC (2020c): Elektroautos: Ladestation, Preise, Stromanbieter. Online verfügbar unter https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-ladesaeulen-strompreise/, zuletzt aktualisiert am 17.02.2021, zuletzt geprüft am 17.02.2021.

ADAC (2020d): Es gurgelt und summt: Testfahrt im neuen Toyota Mirai. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC). Online verfügbar unter https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/toyota/toyota-mirai/, zuletzt geprüft am 01.02.2021.

ADAC (2021): ADAC Ecotest - über Stinker und Saubermänner. Online verfügbar unter https://www.adac.de/infotestrat/tests/eco-test/default.aspx?redirectId=quer.ecotest, zuletzt geprüft am 02.2021.

Agora Verkehrswende (2018): Ein Kostenvergleich zwischen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Pkw als Klimaschutzoption für das Jahr 2030. Unter Mitarbeit von Peter Kasten und Urs Maier. Agora Verkehrswende; Öko-Institut e.V.

Apostolaki-Iosifidou, Elpiniki; Codani, Paul; Kempton, Willett (2017): Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. In: *Energy* 127, S. 730–742. DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.015.

Auf der Maur, Alex; Brüggeshemke, Nils; Kutschera, Michael (2020): Lade-Report. Entwicklung der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität sowie Vergleich der Ladetarife in Deutschland.

Bamberg, Carsten; Lackner, Jascha; Siegemund, Stefan; Auf der Maur, Alex (2020): Privates Ladeinfrastrukturpotenzial in Deutschland. Herausforderungen bei der Entwicklung der privaten Ladeinfrastruktur zur Beschleunigung des Markthochlaufs der Elektromobilität in Deutschland. dena-Studie. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). dena; Prognos.

BCG; Prognos AG (2018): Klimapfade für Deutschland. Unter Mitarbeit von Philipp Gerbert, Patrick Herhold, Jens Buchardt, Stefan Schönberger, Florian Rechenmacher, Almut Kirchner et al.

BCG; Prognos AG (2019): Analyse Klimapfade Verkehr 2030.

BMF (2020a): Reform der Kfz-Steuer. Klare Anreize für eine klimafreundliche Mobilität. Hg. v. BMF. Bundesfinanzministerium. Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Pressemitteilungen/Finanzpolitik/2020/06/2020-06-12-Kfz-Steuer-Reform.html, zuletzt geprüft am 01.02.2021.

BMF (2020b): Reform der Kfz-Steuer. Klare Anreize für eine klimafreundliche Mobilität. Hg. v. BMF. Bundesfinanzministerium. Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Pressemitteilungen/Finanzpolitik/2020/06/2020-06-12-Kfz-Steuer-Reform.html, zuletzt geprüft am 01.02.2021.

BMVI (2019): Mobilität in Deutschland. MiD 2017. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); IVT Research; infas 360 GmbH. Berlin.

BMVI (2020): Startschuss für Wallbox-Förderung / Masterplan Ladeinfrastruktur wird konsequent umgesetzt. Hg. v. Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2020/065-scheuer-startschuss-fuer-wallbox-foerderung.html, zuletzt geprüft am 03.02.2021.

BMWi (2020): Fragen und Antworten zur erhöhten Kaufprämie bei Elektrofahrzeugen. Hg. v. BMWi. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/FAQ/Elektromobilitaet/faq-elektromobilitaet.html, zuletzt geprüft am 25.01.2021.

BNEF (2019): Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At $156/kWh In 2019. BloombergNEF. Online verfügbar unter https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/?sf113554299=1, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

Brown, Adam; Waldheim, Lars; Landälv, Ingvar; Saddler, Jack; Ebadian, Mahmood; McMillan James et al. (2020): Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction. IEA Bioenergy (Task 41: 01 2020).

Brzeski, Carsten; Fechner, Inga (2019): Elektroauto-Bilanz: Welchen Restwert gibt es noch für Elektroautos? Economic & Financial Analysis. ING-DiBa AG.

Bubeck, Steffen; Tomaschek, Jan; Fahl, Ulrich (2016): Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany. In: *Transport Policy* 50, S. 63–77. DOI: 10.1016/j.tranpol.2016.05.012.

Bundesnetzagentur; Bundeskartellamt (2020): Monitoringbericht 2019.

Bundestag (2019): Die Energiesteuer in Bezug auf Kraftstoffe. Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestags - WD 4: Haushalt und Finanzen (WD 4 - 3000 - 143/19).

Bünger, Ulrich; NIcolai, Steffen; Zerhusen, Jan; Monsalve, Cristian; Kharboutli, Samir; Michalski, Jan et al. (2019): Infrastrukturbedarf E-Mobilität. Analyse eines koordinierten Infrastrukturaufbaus zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellen-Pkw in Deutschland. Bericht zum Forschungsprojekt der Ludwig-Bölkow-Stiftung gefördert durch die ADAC Stiftung. Ludwig-Bölkow-Stiftung; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Fraunhofer IOSB.

Burke, Andrew (2020): Zero-Emission Medium- and Heavy-duty Truck Technology, Markets, and Policy Assessments for California.

Check24 (2020): Deutschlands bester Vergleich für Kfz-Versicherungen. Hg. v. CHECK24 Vergleichsportal für Kfz-Versicherungen GmbH. CHECK24 Vergleichsportal für Kfz-Versicherungen GmbH. München. Online verfügbar unter https://www.check24.de/kfz-versicherung/, zuletzt geprüft am 20.12.2020.

dena (2018): dena-Leitstudie: Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena) | Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH). Unter Mitarbeit von Thomas Bründlinger, Julian Elizalde König, Oliver Frank, Dietmar Gründig, Christoph Jugel, Patrizia Kraft et al. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin.

Destatis (2020): Durchschnittlicher Bruttomonatsverdienst von vollzeitbeschäftigten Arbeitnehmern*in Deutschland von 1991 bis 2019. Hg. v. Statista. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/237674/umfrage/durchschnittlicher-bruttomonatsverdienst-eines-arbeitnehmers-in-deutschland/, zuletzt geprüft am 04.02.2021.

Destatis (2021): Preise Verbraucherpreisindizes für Deutschland Lange Reihen ab 1948. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis).

Dexheimer, Verena (2003): Hedonic Methods of Price Measurement for Used Cars. German Federal Statistical Office.

DOE (2017): Fuel Cell System Cost 2017. U. S. Department of Energy. Online verfügbar unter https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17007_fuel_cell_system_cost_2017.pdf, zuletzt geprüft am 13.02.2021.

ecoinvent (2020): ecoinvent. Online verfügbar unter https://www.ecoinvent.org/home.html, zuletzt geprüft am 02.2021.

Edel, Matthias; Jegal, Jakob; Siegemund, Stefan (2019): Bio-LNG – eine erneuerbare und emissionsarme Alternative im Straßengüter- und Schiffsverkehr. Potenziale, Wirtschaftlichkeit und Instrumente. Unter Mitarbeit von Patrick Schmidt und Werner Weindorf. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

electrive.com (2019): VW announces €399 ID.3 Wallbox charger. Hg. v. electrive.com. Online verfügbar unter https://www.electrive.com/2019/09/11/vw-announces-e399-id-3-wallbox-charger/#:~:text=Charger.,which%20will%20cost%20849%20euros., zuletzt geprüft am 03.02.2021.

electrive.net (2021): Eckpfeiler von Audis Verbrenner-Ausstiegsplan. Online verfügbar unter https://www.electrive.net/2021/01/22/eckpfeiler-von-audis-verbrenner-ausstiegsplan/, zuletzt aktualisiert am 22.01.2021, zuletzt geprüft am 18.02.2021.

Emilsson, Erik; Dahllöf, Lisbeth (2019): Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO 2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling.

energate messenger (2020): Batteriesysteme machen E-Tankstellen effizienter. Online verfügbar unter https://www.energate-messenger.de/news/203489/-batteriesysteme-machen-e-tankstellen-effizienter-, zuletzt aktualisiert am 28.02.2021, zuletzt geprüft am 28.02.2021.

Energieheld (2020): Elektroauto - Ladekarten für Stromtankstellen im Preis-Vergleich. Online verfügbar unter https://www.energieheld.de/mobilitaet/elektroauto/ladekarten, zuletzt aktualisiert am 17.02.2021, zuletzt geprüft am 17.02.2021.

Energy Environment Agency (2018): Gross electricity production by fuel. Online verfügbar unter https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/gross-electricity-production-by-fuel-4#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_sector%22%3A%5B%22Coal%20and%20lignite%22%3B%22Natural%20and%20de, zuletzt geprüft am 02.2021.

Energy Environment Agency (2020): EEA greenhouse gas projections. data viewer. Online verfügbar unter https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/eea-greenhouse-gas-projections-data-viewer, zuletzt geprüft am 02.2021.

eucar (2019): Battery requirements for future automotive applications. Online verfügbar unter https://eucar.be/wp-content/uploads/2019/08/20190710-EG-BEV-FCEV-Battery-requirements-FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

Festel, Gunter; Würmseher, Martin; Rammer, Christian; Boles, Eckhard; Bellof, Martin (2013): Modelling Production Cost Scenarios for Biofuels and Fossil Fuels in Europe. ZEW GmbH. Online verfügbar unter http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp13075.pdf.

FEV (2014): P2 Hybrid Electrification System Cost Reduction Potential Constructed on Original Cost Assessment.

FEV (2017): SPECTRUM Zero Emission Strategies.

Fisch und Fischl GmbH (2021): Spritmonitor.de. Verbrauchswerte real erfahren. Online verfügbar unter https://www.spritmonitor.de/de/suche.html, zuletzt geprüft am 02.2021.

Fischhaber, Sebastian; Regett, Anika; Schuster, Simon F.; Hesse, Holger (2016): Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen. Analyse von Nachnutzungsanwendungen, öknomischen und ökologischen Potenzialen. Hg. v. Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW) (Ergebnispaper Nr. 18).

Flach, Bob; Lieberz, Sabine; Bolla, Sophie (2020): Biofuels Annual. Hg. v. United States Department of Agriculture.

Fraunhofer ISI; Consentec GmbH; ifeu; TU Wien; TEP Energy; M-Five GmbH (2017a): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 0: Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Unter Mitarbeit von Christiane Bernath, Tobias Bossmann, Gerda Deac, Rainer Elsland, Tobias Fleiter, André Kühn et al.

Fraunhofer ISI; DVGW (2018): Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung - Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen. Endbericht. Unter Mitarbeit von Martin Wietschel. Hg. v. Umweltbundesamt (UFOPLAN 2014 – FZK 3714 41 107 2).

Fraunhofer ISI; Fraunhofer IML; PTV (2017b): Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“. Unter Mitarbeit von Till Gnann, Martin Wietschel, Andreas Kühn, Axel Thielmann, Andreas Sauer, Patrick Plötz et al. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/teilstudie-brennstoffzellen-lkw.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 13.02.2021.

Fraunhofer ISI; Fraunhofer IML; PTV Group; Technische Universität Hamburg (TUHH); M-Five GmbH (2018): Gestaltung des Referenzszenarios zur Nutzung in der MKS 2017+. ARBEITSPAPIER zum Projekt - Unterstützung des BMVI bei der Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Unter Mitarbeit von Wolfgang Schade, Erick Perez, Daniel Berthold, Udo Wagner, Michael Krail und Volker Waßmuth. Karlsruhe.

Fraunhofer IWES (2017): Mittel- und langfristige Potenziale von PtL- und H2-Importen aus internationalen Vorzugsregionen. Teilbericht im Rahmen des Projektes: KLIMAWIRKSAMKEIT ELEKTROMOBILITÄT - Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Unter Mitarbeit von Norman Gerhardt, Maximilian Pfennig, Carsten Pape und Diana Böttger. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Förderkennzeichen: 16EM3007).

Fries, Michael; Kerler, Mathias; Rohr, Stephan; Schickram, Stephan; Sinning, Michael; Lienkamp, Markus (2017): An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Cost of Ownership. Update 2017. Technische Universität München. München.

Funke, Simon Árpád (2018): Techno-ökonomische Gesamtbewertung heterogener Maßnahmen zur Verlängerung der Tagesreichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen (Dissertation Universität Kassel).

GDV (2020): Regionalklassen nach Bundesländern 2021. Hg. v. GDV. Online verfügbar unter https://www.gdv.de/de/themen/news/regionalklassen-nach-bundeslaendern-35110.

GDV (2021): Überblick Kfz-Versicherung. Online verfügbar unter https://www.gdv.de/de/zahlen-und-fakten/versicherungsbereiche/ueberblick-4660, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Generalzolldirektion (2020): Kraftfahrzeugsteuer. Hg. v. Generalzolldirektion. Online verfügbar unter https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verkehrsteuern/Kraftfahrzeugsteuer/kraftfahrzeugsteuer_node.html, zuletzt geprüft am 01.02.2021.

Genovese, Antonino; Ortenzi, Fernando; Villante, Carlo (2015): On the energy efficiency of quick DC vehicle battery charging. In: *WEVJ* 7 (4), S. 570–576. DOI: 10.3390/wevj7040570.

Gnann, Till (2015): Market diffusion of plug-in electric vehicles and their charging infrastructure. Karlsruhe (Dissertation Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)).

Guo, Zhaomiao; Zhou, Yan (2019): Residual value analysis of plug-in vehicles in the United States. In: *Energy Policy* 125, S. 445–455. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.10.023.

H2 Mobility (2021): Übersicht verfügbare Wasserstoffautos. Online verfügbar unter https://h2.live/wasserstoffautos, zuletzt geprüft am 18.02.2021.

Haarlemmer, Geert; Biossonnet, Guillaume; Imbach, Juliette; Setier, Pierre-Alexandre; Peduzzi, Emanuela (2012): Second generation BtL type biofuels – a production cost analysis.

Hacker, Florian; Waldenfels, Rut von; Mottschall, Moritz (2015): Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen. Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potenzialen und möglicher CO2-Minderung. Abschlussbericht. Öko-Institut e.V. Berlin.

Hänggi, Severin; Elbert, Philipp; Bütler, Thomas; Cabalzar, Urs; Teske, Sinan; Bach, Christian; Onder, Christopher (2019): A review of synthetic fuels for passenger vehicles. In: *Energy Reports* 5, S. 555–569. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.04.007.

Harto, Chris (2020): Electric Vehicle Ownership Costs: Chapter 2 - Maintenance. Consumer Reports.

H-D Systems (2018): Review of the Technology Costs and Effectiveness Utilized in the Proposed SAFE Rule.

Hebling, C.; Ragwitz, M.; Fleiter, T.; Groos, U.; Härle, D.; Held, A. et al. (2019): Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Karlsruhe und Freiburg.

Helms, Hinrich; Fehrenbach, Horst; Biemann, Kirsten; Kämper, Claudia; Lambrecht, Udo; Jöhrens, Julius; Meyer, Kerstin (2019a): Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen.

Helms, Hinrich; Kämper, Claudia; Biemann, Kirsten; Lambrecht, Udo; Jöhrens, Julius; Meyer, Kerstin (2019b): Klimabilanz vo Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. 2. Auflage.

Hill, Nikolas; Amaral, Sofia; Morgan-Price, Samantha; Nokes, Tom; Bates, Judith; Helms, Hinrich et al. (2020): Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA.

Hoekstra, Auke; Vijayashankar, Anand; Sundrani, Vedant Linesh (2017): Modelling the Total Cost of Ownership of Electric Vehicles in the Netherlands.

Hofmann, Peter (2014): Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft. 2. Aufl. Wien: Springer. Online verfügbar unter http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1802980.

Hülsmann, Friederike; Mottschall, Moritz; Hacker, Florian; Kasten, Peter (2014): Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/oekodoc/2105/2014-662-de.pdf, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

ICCT (2019): Unterschied zwischen offiziellem und realem Kraftstoffverbrauch für neue Pkw in Europa stagniert erstmals. Online verfügbar unter https://theicct.org/news/unterschied-zwischen-offiziellem-und-realem-kraftstoffverbrauch-neue-pkw-europa-stagniert#:~:text=Unterschied%20zwischen%20offiziellem%20und%20realem%20Kraftstoffverbrauch%20f%C3%BCr%20neue%20Pkw%20in%20Europa%20stagniert%20erstmals,-2019.01.10&text=Der%20reale%20Kraftstoffverbrauch%20neuer%20Pkw,von%20den%20Fahrzeugherstellern%20angegebene%20Testverbrauch., zuletzt geprüft am 02.2021.

ICPC (2019): 10th AVL International Commercial Powertrain Conference. Online verfügbar unter https://www.avl.com/documents/10138/6781105/ICPC+2019+Proceedings.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

IEA (2019a): The Future of Hydrogen. Paris. Online verfügbar unter https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

IEA (2019b): World Energy Outlook 2019. Paris. Online verfügbar unter https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019.

International Energy Agency (2021): Data and statistics. Online verfügbar unter https://www.iea.org/data-and-statistics.

Islam, Ehsan; Moawad, Ayman; Kim, Namdoo; Rousseau, Aymeric (2020): Energy Consumption and Cost Reduction of Future Light-Duty Vehicles through Advanced Vehicle Technologies: A Modeling Simulation Study Through 2050.

James, Brian (2018): 2018 Cost Projections of PEM Fuel Cell Systems for Automobiles and Medium-Duty Vehicles. Fuel Cell Technologies Office Webinar. United States Department of Energy (DOE), 25.04.2018.

Jander, Bojan; Salomon, Alexander; Biet, Clemens; Brodbeck, Philipp; Sophie-Gern, Maike; Inci, Ferhat et al. (Hg.) (2020): Spannungsfeld Fahrzeugantriebe - Gedenkschrift für Prof. Dr.-Ing. Roland Baar. Unter Mitarbeit von Roland Baar. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin.

Kasten, Peter; Maier, Urs (2018): Ein Kostenvergleich zwischen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Pkw als Klimaschutzoption für das Jahr 2030. Hg. v. Agora Verkehrswende. Agora Verkehrswende; Öko-Institut e.V.

KBA (2019): Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen. Hg. v. KBA. Online verfügbar unter

https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz11/fz11_gentab.html, zuletzt geprüft am 01.02.2021.

KBA (2020a): Liste der förderfähigen Elektrofahrzeuge. Hg. v. KBA. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/emob_liste_foerderfaehige_fahrzeuge.html, zuletzt geprüft am 01.02.2021.

KBA (2020b): Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen. Hg. v. KBA. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/monatl_neuzulassungen_node.html, zuletzt geprüft am 01.02.2021.

Kemmler, Andres; Kirchner, Almut; Maur, Alex auf der; Ess, Florian; Kreidelmeyer, Sven; Piégsa, Alexander et al. (2021): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Gesamtdokumentation der Szenarien.

Kleiner, Florian; Özdemir, Enver Doruk; Schmid, Stephan; Beermann, Martin; Çatay, Bülent; Moran, Bob et al. (2015): Electrification of transport logistic vehicles: A techno-economic assessment of battery and fuel cell electric transporter.

Köstlinger, Stefan (2020): Wallbox: 11 kW oder 22 kW – Wir erklären Ihnen den Unterschied! Hg. v. energielösung GmbH. Online verfügbar unter https://www.energieloesung.de/magazin/wallbox-11kw-oder-22kw-wir-erklaeren-ihnen-den-unterschied, zuletzt aktualisiert am 03.02.2021.

Kraftfahrtbundesamt (2020): Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz11/fz11_gentab.html, zuletzt geprüft am 02.2021.

Kramer, Ulrich (2019): Defossilisierung des Transportsektors. Optionen und Voraussetzungen in Deutschland. Unter Mitarbeit von Felix Ortloff und Ralf Thee. Hg. v. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. Berlin.

Letmathe, Peter; Suares, Maria (2017): A consumer-oriented total cost of ownership model for different vehicle types in Germany. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 57, S. 314–335. DOI: 10.1016/j.trd.2017.09.007.

Li, Hongwei; Chen, Chuan (2019): Research on Residual Value Evaluation of Battery Electric Vehicles Based on Replacement Cost Method. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Sci. 461 012027).

Mamakos, Athanasios (2011): Feasibility of Introducing Particulate Filters on Gasoline Direct Injection Vehicles. A Cost Benefit Analysis. Unter Mitarbeit von Giorgio Martini, Panagiota Dilara und Yannis Drossinos. EC Joint Research Center (JRC). Luxemburg (JRC Scientific and Policy Reports, Report EUR 25297 EN).

MCC; PIK (2019): Bewertung des Klimapakets und nächste Schritte: CO2-Preis, sozialer Ausgleich, Europa, Monitoring. Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH; Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK). Berlin.

Millinger, Markus (2018): Systems assessment of biofuels Modelling of future cost and greenhouse gas abatement competitiveness between biofuels for transport on the case of Germany. Dissertation. Universität Leipzig, Leipzig.

Minjares, Ray; Sanchez, Francisco Posada (2011): Estimated Cost of Gasoline Particulate Filters. Working Paper. ICCT.

Müller-Langer, Franziska; Majer, Stefan; O'eeffe Sinéad (2014): Benchmarking biofuels—a comparison of technical, economic and environmental indicators.

NPM (2020a): Bedarfsgerechte und wirtschaftliche öffentliche Ladeinfrastruktur. Plädoyer für ein dynamisches NPM-Modell. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI. Nationale Plattform Mobilität, Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung".

NPM (2020b): Einsatzmöglichkeiten unter realen Rahmenbedingungen. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität. Online verfügbar unter https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/06/NPM-AG-2_Einsatzmöglichkeiten-unter-realen-Rahmenbedingungen.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

NPM (2020c): Roadmap PTX. ARBEITSGRUPPE 5 - Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung. Hg. v. Nationale Plattform Mobilität.

Öko-Institut e.V. (2019): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Unter Mitarbeit von Peter Kasten, Moritz Mottschall, Sven Kühnel und Lukas Minnich. Hg. v. Umweltbundesamtes. Berlin (TEXTE 114/2019).

Özdemir, Enver Doruk (2012): The future role of alternative powertrains and fuels in the German transport sector.

Perner, Jens; Unteutsch, Michaela; Lövench, Andrea (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Unter Mitarbeit von Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics. Berlin.

Plötz, Patrick; Gnann, Till; Kühn, André; Wietschel, Martin (2014a): Markthochlaufszenarien für Elektrofahrzeuge. Langfassung. Studie im Auftrag der acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.

Plötz, Patrick; Gnann, Till; Ullrich, Sandra; Haendel, Michael; Globisch, Joachim; Dütschke, Elisabeth et al. (2014b): Elektromobilität in gewerblichen Flotten. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Bieker, Georg; Mock, Peter; Li, Yaoming (2020a): real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles. fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions.

Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Bieker, Georg; Mock, Peter; Li, Yaoming (2020b): Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles: Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions. White Paper. Fraunhofer ISI; ICCT.

PNAS (2018): Expert assessments of the cost and expected future performance of proton exchange membrane fuel cells for vehicles. Unter Mitarbeit von Michael M. Whiston, Ines L. Azevedo, Shawn Litster, Kate S. Whitefoot, Constantine Samaras und Jay F. Whitacre. Online verfügbar unter https://www.pnas.org/content/116/11/4899, zuletzt geprüft am 13.02.2021.

Prognos AG (2020a): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe“. Unter Mitarbeit von Sven Kreidelmeyer, Hans Dambeck, Almut Kirchner und Marco Wünsch. Hg. v. BMWi.

Prognos AG; Fraunhofer ISI; GWS; iinas (2021): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050. Gesamtdokumentation der Szenarien. Im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Prognos AG; Fraunhofer UMSICHT; DBFZ (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Eine Studie der Prognos AG, des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und des Deutschen Biomasseforschungszentrums DBFZ. Endbericht. Unter Mitarbeit von Jens Hobohm, Alex auf der Mauer, Hans Dambeck, Andreas Kemmler, Sylvie Koziel, Sven Kreidelmeyer et al.

Prognos AG; Öko-Institut e.V.; Wuppertal Institut gGmbH (2020b): Klimaneutrales Deutschland. In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Hg. v. Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Berlin (195/03-S-2020/DE | 48-2020-DE).

Projektgruppe Gemeinschaftsdiagnose (Hg.) (2020): Gemeinschaftsdiagnose 2-2020. Erholung verliert an Fahrt – Wirtschaft und Politik weiter im Zeichen der Pandemie. Herbst 2020. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; DIW Berlin; ifo Institut; KOF der ETH Zürich, IfW Kiel, IWH; RWI.

Propfe, Bernd; Redelbach, Martin; Santini, Danilo J.; Friedrich, Horst (2012): Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. Institute of Vehicle Concepts, German Aerospace Center (DLR). Los Angeles.

Prussi, Matteo; Yugo, Marta; Prada, Luis de; Padella, Monica; Edwards, Robert (2020): JEC Well-to-Wheels report v5. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Hg. v. Publications Office of the European Union.

Ricardo (2015): Improving understanding of technology and costs for CO2 reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves. Unter Mitarbeit von Nikolas Hill, Elisabeth Windisch, Felix Kirsch, Gareth Horton, Craig Dun, Stefan Hausberger et al.

Robinius, Martin; Linßen, Jochen; Grube, Thomas; Reuß, Markus; Stenzel, Peter; Syranidis, Konstantinos et al. (2018): Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. Hg. v. H2Mobility. Forschungszentrum Jülich GmbH; RWTH Aachen Institut für elektrochemische Verfahrenstechnik (Energie & Umwelt / Energy & Environment, 408).

Robinius, Martin; Markewitz, Peter; Lopion, Peter; Kullmann, Felix; Heuser, Philipp-Matthias; Syranidis, Konstantinos et al. (2019): Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Kurzfassung. Hg. v. Forschungszentrum Jülich GmbH.

Ruffini, Eleonora; Wei, Max (2018): Future costs of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach. In: *Energy* 150, S. 329–341. DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.071.

Scherrer, Aline; Burghard, Uta; Wietschel, Martin; Dütschke, Elisabeth (2019): Early Adopter von E-Fahrzeugen: Ladeleistungen, Eigenerzeugung und Einstellungen zum Lademanagement 69 (11), S. 23–26.

Sens, Marc; Pannewitz, Marcel; Forell, Alexander; Brauer, Maximilian; Wukisiewitsch, Wolfgang; Kratzsch, Matthias: Antriebskonzepte auf dem Weg zur CO2 neutralen Mobilität: Powertrain concepts on the path to CO2 neutral mobility. In: Internationales Wiener Motorensymposium, Bd. 1.

Siegemund, Stefan; Trommler, Marcus; Kolb, Ole; ZInnecker, Valentin; Schmidt, Patrick; Weindorf, Werner et al. (2017): E-Fuels Study - The potential of electricity-based fuels for low-emission transportin the EU. An expertise by LBST and dena. Berlin.

Soler Estralla, Alba (2020): Role of e-fuels in the European transport system. Literature review. Unter Mitarbeit von Marta Yugo. Hg. v. Concawe. Brüssel (Report No. 14/19).

Stahl Automotive Consulting GmbH & Co. KG (Hg.) (2020): Der Weg hin zu einer CO2-armen Mobilität – Neue Perspektiven zur Verkehrs- und Energiewende in Deutschland.

T&E (2016): Gasoline particulate emissions: The next auto scandal? Unter Mitarbeit von Florent Grelier. Transport and Environment (T&E).

Takeshita (2019a): B3 report 18-19/Chapter 11 LIB Materials Market Bulletin. B3 Corp.

Takeshita (2019b): E19Q4 xEV Market & Long Term.

Thielmann, Axel; Neef, Christoph; Hettesheimer, Tim (2018): Cost Development, Cost Structure & Cost Reduction Potentials of Electric Vehicle Batteries. 3rd Graz Battery Days. Graz, 2018.

Thielmann, Axel; Neef, Christoph; Hettesheimer, Tim; Döscher, Henning; Wietschel, Martin; Tübke, Jens (2017): Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. Hg. v. Fraunhofer ISI. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger Jülich (PtJ).

Tschiesner, Andreas; Hertzke, Patrick; Schaufuss, Patrick; Gersdorf, Thomas (2020): Special Report: Where does 48V technology plug in to the future of mobility. Hg. v. Automotive World est. 1992.

UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - Rescue Studie. Unter Mitarbeit von Katja Purr, Jens Günther, Harry Lehmann und Philip Nuss. Umweltbundesamt UBA. Dessau-Roßlau (CLIMATE CHANGE 36/19).

UBA (2020): Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030. Kurzbericht. CLIMATE CHANGE 12/2020. Hg. v. Umweltbundesamt UBA. Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI; IREES GmbH (Forschungskennzahl 3718 41 002 0).

UBS (2017): UBS Evidence Lab Electric Car Teardown – Disruption Ahead? Online verfügbar unter https://neo.ubs.com/shared/d1wkuDlEbYPjF/, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

Umweltbundesamt: Entwicklung des durchschnittlichen Brutto-Wirkungsgrades fossiler Kraftwerke. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/bild/entwicklung-des-durchschnittlichen-brutto, zuletzt geprüft am 02.2021.

van Vliet, Oscar (2010): Feasibility of alternatives to driving on diesel and petrol.

VDI; VDE (2019): Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge.

VW (2018): Electric charging for fleets. Hg. v. Volkswagen Aktiengesellschaft. Online verfügbar unter https://www.volkswagenag.com/presence/konzern/group-fleet/dokumente/Compendium_Electric_charging_for_fleets.pdf, zuletzt geprüft am 03.02.2021.

Weemaes, Guy: Zulassungszahlen von Elektroautos und Plug-in Hybriden. Online verfügbar unter https://www.goingelectric.de/zulassungszahlen/, zuletzt geprüft am 02.2021.

Wietschel, Martin; Moll, Cornelius; Oberle, Stella; Lux, Benjamin; Timmerberg, Sebastian; Ashley-Belbin, Natalja (2019): Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. Endbericht: Gefördert vom Biogasrat+ e.V. Fraunhofer ISI. Karlsruhe.

Wolfram, Paul; Lutsey, Nic (2016): Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions. Hg. v. The International Council on Clean Transportation (ICCT). Online verfügbar unter https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LitRvw_EV-tech-costs_201607.pdf, zuletzt geprüft am 03.02.2021.

Yazdanie, Mashael; Noembrini, Fabrizio; Heinen, Steve; Espinel, Augusto; Boulouchos, Konstantinos (2016): Well-to-wheel costs, primary energy demand, and greenhouse gas emissions for the production and operation of conventional and alternative vehicles. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 48, S. 63–84. DOI: 10.1016/j.trd.2016.08.002.

Yole (2020): YDR20068_Li-ion_Battery_Pack_for_Automotive_and_Stationary_Storage_Applications.

Zacher, Marcus (2019): WLTP: So werden Reichweite und Verbauch bei Elektroautos ermittelt. Online verfügbar unter https://generationstrom.com/2019/08/27/wltp/, zuletzt geprüft am 02.2021.

Zapf, Martin; Pengg, Hermann; Bütler, Thomas; Bach, Christian; Weindl, Christian (2020): Kosteneffiziente und Nachhaltige Automobile. Bewertung der Realen Klimabelastung und der Gesamtkosten - Heute und in Zukunft. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Zeddies, J.; Schönleber, N. (2017): Auswirkungen politischer Beschlüsse auf Biokraftstoffe und Rohstoffmärkte. Hg. v. ufop, VDB, OVID.

Abkürzungen

BEV	Battery Electric Vehicle
CBG	Compressed Bio Gas
CNG	Compressed Natural Gas
CSG	Compressed Synthetic Gas
EV	Electric Vehicle
FFV	Flex-Fuel Fahrzeuge
FHEV	Full Hybrid Electric Vehicle
HPC	High Power Charging
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (in dieser Studie Benzin- und Dieselfahrzeuge sowie deren hybridisierte Varianten)
LCA	Life Cycle Analysis
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PtG	Power to Gas
PtH2	Power to Hydrogen
PtL	Power to Liquid
TCO	Total Cost of Ownership
WLTC	Worlwide Harmonized Light Vehicle Test Cycle



dena
Deutsche Energie-Agentur