

Technische Universität München
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Entwicklung einer Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs unter realen Rahmenbedingungen und dessen Anwendung auf verschiedene Pkw-Antriebsvarianten

Benedikt Graf-Hollweck

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner

2. Prof. Dr. rer. nat. K. Andreas Friedrich

Die Dissertation wurde am 20.11.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 09.08.2021 angenommen.

Zusammenfassung

Bedingt durch die Auswirkungen auf den Klimawandel und die Gesundheit der Menschen, wird die Freisetzung von Schadstoffen und von Treibhausgasen während eines Pkw-Betriebs gesetzlich sukzessive reduziert. Verschärfte CO₂-Vorgaben führen in diesem Zusammenhang zu einem erhöhten Elektrifizierungsgrad der Antriebe. Hybrid-, Plug-In-, Range-Extender-, Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge werden entwickelt und die Effizienz der Antriebe wird erhöht. Folglich steigt der relative Anteil des Energiebedarfs der Nebenverbraucher an dem gesamtheitlichen Energiebedarf, was eine Analyse des Energiebedarfs ohne den Einfluss der Nebenverbraucher an Bedeutung verlieren lässt. Aus der steigenden Wichtigkeit des Energiebedarfs der Nebenverbraucher, durch einen höher gewichteten Anteil der benötigten Energie für die Temperierung der Fahrgastzelle und der Komponenten und durch einer vermehrt fehlenden Abwärme, abgeleitet, stellt sich die Frage nach einer Methodik für eine einheitlichen Berücksichtigung des gesamtheitlichen Energiebedarfs und dessen Anwendung auf verschiedene Antriebsvarianten. Dieser Fragestellung gewidmet, beinhaltet die vorliegende Arbeit eine Methode für eine einheitliche Bewertung verschiedener Antriebsvarianten anhand europäischer Referenzfahrzeugsegmente und europäischer Klimaeinflüsse und dessen Anwendung auf verschiedene Antriebsvarianten.

Mit dem Ziel den Energiebedarf inklusive des Einflusses der Nebenverbraucher für verschiedene Antriebsvarianten einheitlich und realitätsnah abzubilden, wird zunächst eine gesamtheitliche Methodik entwickelt. Hierzu werden Nutzerverhalten und Fahrprofile analysiert, Referenzfahrzeuge gebildet, Wetter- und Startbedingungen berücksichtigt und modulare Gesamtfahrzeugsimulationsmodelle aufgebaut. Die wesentlichen Komponenten der Antriebsstränge werden mithilfe einer Methodik so ausgelegt, dass definierte Anforderungen bzgl. der Fahrzeugeigenschaften, wie beispielsweise eine segmenttypische Beschleunigungszeit von 0 km/h auf 100 km/h, erfüllt werden. Da beispielsweise eine höhere Reichweitenanforderung die Beschleunigung aufgrund des Mehrgewichts negativ beeinflusst, ist dazu ein iteratives Vorgehen erforderlich. Des Weiteren wird eine Prognose sowohl der Fahrleistungs- und der Fahrwiderstandsentwicklung als auch der Komponentenmassen und der Komponentenentwicklung erarbeitet, um den Energiebedarf neben dem Betrachtungsjahr 2015 auch für das Prognosejahr 2025 zu simulieren. Bei Ersterem wird die Leistung des konventionellen Antriebsstrangs, der Luft- und der Rollwiderstandsbeiwert und die Karosseriemasse prognostiziert. Bei Zweiterem wird eine mögliche Entwicklung des Batterie-, des Brennstoffzellen- und des Wasserstofftanksystems, der elektrischen Antriebseinheit, des Verbrennungsmotors und sonstiger Massen erarbeitet. Mit den ausgearbeiteten Entwicklungsszenarien werden die Antriebsvarianten für das Prognosejahr 2025 ausgelegt. Das angewandte Vorgehen wird an dem Ende des Kapitels der Methodenbeschreibung dokumentiert.

Auf die Methodik folgend wird eine Validierung auf Komponenten-, auf Modul- und auf Gesamtfahrzeugebene durchgeführt, um die Genauigkeit der Modellierung zu überprüfen. Dabei werden auf Komponentenebene die Komponenten Batteriesystem, Brennstoffzellensystem, elektrische Antriebseinheit und Verbrennungsmotor, auf Modulebene ein temperatur- und geschwindigkeitsabhängiges Reifenmodell, die Klimatisierung der Fahrgastzelle und der Energiebedarf verschiedener Antriebsvarianten ohne dem Einfluss der Nebenverbraucher und auf Gesamtfahrzeugebene die Fahrzeugvarianten Batteriefahrzeug und Fahrzeug mit einem Ottomotor inklusive der Nebenverbraucher validiert. Für jeden Unterpunkt wird zunächst der durchgeführte Aufbau detailliert beschrieben und anschließend validiert. In dem der Validierung dienenden Kapitel wird gezeigt, dass die simulierten Ergebnisse realitätsnahe Verläufe widerspiegeln und eine gesamtheitliche Energiebedarfsanalyse darauf aufgebaut werden kann.

Basierend auf den Ergebnissen des Abschnitts der Validierung und der ermittelten Auslegung der Antriebe werden Gesamtfahrzeugmodelle aufgebaut. In diesem Zusammenhang wird eine modulare Struktur angewandt, um gleichzeitig Synergieeffekte zu nutzen und eine maximale Vergleichbarkeit der Antriebe sicherzustellen. Der verwendete, modulare Aufbau wird in die Untergruppen „Fahrzeugarchitektur“, „Antriebsstrang mechanisch und elektrisch“, „Antriebsstrang thermisch“ und „Fahrgastzelle thermisch“ gegliedert. Sowohl für die Antriebsvarianten Batterie-, Brennstoffzellen-Range-Extender-, Brennstoffzellen-Plug-In- und Brennstoffzellenfahrzeug als auch für ein Fahrzeug mit einem Otto- oder mit

einem Dieselmotor wird der modulare Aufbau detailliert erörtert und die angewandten Betriebsstrategien diskutiert. Für das Batterie- und das Brennstoffzellenfahrzeug wird neben einem Aufbau für das Betrachtungsjahr 2015 auch ein möglicher Aufbau für das Prognosejahr 2025 beschrieben.

Aufbauend auf der entwickelten Methodik, der durchgeführten Validierung und dem Aufbau der Gesamtfahrzeugmodelle wird eine Analyse des gesamtheitlichen Energiebedarfs durchgeführt. Als Erstes werden dabei unterschiedliche Fahrprofile ohne spezielle Nebenverbraucher untersucht, um sowohl einen Referenzwert als Vergleichsbasis zu generieren als auch den Einfluss der Zyklen auf den Energiebedarf zu ermitteln. Anschließend werden verschiedene Wetterbedingungen und dessen Auswirkungen auf den Energiebedarf des Betrachtungsjahrs 2015 untersucht. Zunächst wird der saisonale Energiebedarf in Deutschland analysiert. Hierbei wird der sich verändernde durchschnittliche Verbrauch pro 100 km über der Fahrlänge sowohl für die drei Fahrprofile Innerorts, Außerorts und Autobahn als auch für die Jahreszeiten Winter, Frühling, Sommer und Herbst evaluiert. Die Antriebsvarianten Batterie-, Brennstoffzellen-Range-Extender-, Brennstoffzellen-Plug-In- und Brennstoffzellenfahrzeug als auch Fahrzeuge mit einem Otto- oder mit einem Dieselmotor werden diesbezüglich untersucht. Anschließend erfolgt die gleiche Analyse für die Länder Spanien und Norwegen. Hierbei und folgend werden die Antriebsvarianten Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug als auch das Fahrzeug mit einem Ottomotor für eine mittlere Segmentklasse betrachtet. Nach der Evaluierung des Energiebedarfs für verschiedene europäische Länder erfolgt eine Analyse differenzierter Startbedingungen. Diesbezüglich werden exemplarisch die drei Ausgangsbedingungen „Schatten“, „Aufgeheizt“ und „Vorkonditioniert“ untersucht. Für eine dedizierte Bewertung des Einflusses variabler Wetterbedingungen werden zudem sowohl der wärmste bzw. der kälteste 1-%-Wetterverlauf als auch die kältesten bzw. die wärmsten 20 % des Winters bzw. des Sommers dem durchschnittlichen Winter-, Sommer- und Jahresverbrauch gegenübergestellt. Die Analyse erfolgt dabei und folgend für das Betrachtungsland Deutschland. Durch die Simulation von je fünf Startzeiten und fünf Temperaturklassen je Jahreszeit wird eine Datenbasis geschaffen, welche es erlaubt verschiedene Nutzerprofile und Fahrzeugflotten zu analysieren. Zunächst erfolgt in diesem Zusammenhang eine Betrachtung des Energiebedarfs für das Fahrverhalten der deutschen Privat-Pkw-Flotte. Dazu werden die Fahrprofile aus jener in dem Abschnitt der Beschreibung der Methodik ausgewerteten Studie „Mobilität in Deutschland“ herangezogen. Nach einer Evaluierung einer Fahrzeugflotte erfolgt eine Untersuchung von drei repräsentativen Nutzerprofilen. Ein Kurz-, ein Mittel-, und ein Langstreckenfahrer werden definiert und der jeweils resultierende Energiebedarf gegenübergestellt. Nachdem der Einfluss der Nebenverbraucher auf den Energiebedarf des Betrachtungsjahrs 2015 analysiert wurde, erfolgt die Untersuchung für das Prognosejahr 2025 für die beiden Antriebsvarianten Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug. Dabei wird analog der Analyse des Betrachtungsjahrs 2015 vorgegangen. Hierbei wird zunächst die Auswirkung verschiedener Zyklen und folgend sowohl der Einfluss saisonaler Wetterbedingungen als auch jener des Fahrprofils untersucht. Für die Analyse des gesamtheitlichen Energiebedarfs des Prognosejahrs 2025 wird ausschließlich das Wetterprofil Deutschland herangezogen.

Mit dem Erarbeiten der Methodik, der Validierung der Aufbauten, dem Erstellen der Gesamtfahrzeugsimulationsmodelle und der Auswertung der Simulationsergebnisse wird der Einfluss der Nebenverbraucher auf den Energiebedarf einheitlich abgebildet und ein realitätsnaher Energiebedarf ermittelt. Für das Betrachtungsjahr 2015 und das Prognosejahr 2025 wird dieser für unterschiedliche Antriebsvarianten detailliert analysiert und verglichen. Aus den festgestellten Ergebnissen zeigt sich, dass der zusätzliche Energiebedarf der weiteren Leistungskonsumenten nicht vernachlässigt werden darf. Besonders unter kalten Bedingungen und in Fahrsituationen mit niedrigen Geschwindigkeiten zeigt sich ein deutlicher Einfluss auf den Energiebedarf durch die zusätzliche Leistung der Nebenverbraucher. Je höher die Antriebsvarianten dabei elektrifiziert sind, desto stärker fällt dieser aus. Dieser Zusammenhang begründet sich teilweise aus einer fehlenden Abwärme und teilweise aus einem erniedrigten Basisverbrauch aufgrund erhöhter Komponenteneffizienzen.

Abstract

Due to the effects on climate change and human health, the formation of pollutants and greenhouse gas emissions during car operation is gradually being reduced by law. Stricter CO₂ requirements lead to an increased degree of the drivetrains' electrification. Hybrid, plug-in, range extenders, batteries and fuel cell vehicles are developed and the drivetrains' efficiency is increased. As a result, the relative share of the auxiliary consumers energy consumption in the overall energy consumption increases, which leads to a decreased importance of an energy consumption analysis without the auxiliary loads' influence. Derived from the increasing importance of the energy demand of the secondary consumers, through a higher weighted share of the energy required for the thermal management of the vehicle cabin and the components and through an increased lack of waste heat utilisation, the question of a method for a uniform evaluation of the overall energy demand and its application to different drive variants arises. Dedicated to this question, the present work carries out a novel method for a uniform evaluation of different drive variants based on European reference vehicle segments and European climate influences and its application to different drive variants.

For the sake of to be able to represent the energy demand including the auxiliary loads' influence for different drivetrain variants in a uniform and realistic manner, firstly a new methodology is developed. For this purpose, user behaviour and driving profiles are analysed, reference vehicles are created, weather and start conditions are considered and modular overall vehicle simulation models are built. The essential components of the drive trains are designed using a methodology so that defined requirements with regard to the vehicle properties, such as a segment-typical acceleration time from 0 km/h to 100 km/h, are met. Since, for example, a higher range requirement has a negative impact on acceleration due to the extra weight, an iterative approach is required. Furthermore, a prognosis of the development of the mileage and the driving resistance as well as of the component masses and the component development is worked out in order to simulate the energy demand for the year under review 2015 as well as for the forecast year 2025. In the former, the performance of the conventional drive train, the aerodynamic and rolling resistance coefficients and the body mass are predicted. In the second, a possible development of the battery, fuel cell and hydrogen tank system, the electric drive unit, the internal combustion engine and other masses is being worked out. With the developed development scenarios, the drive variants are designed for the forecast year 2025. The procedure used is documented at the end of the method chapter.

Subsequently to the methodology chapter, a validation is carried out on component, on module and on overall vehicle level in order to prove the accuracy of the model build up. At the component level, the components battery system, fuel cell system, electric drive unit and combustion engine, at module level a temperature and speed-dependent tire model, the air conditioning of the vehicle cabin and the energy demand of different drive variants without the influence of secondary consumers and at the overall vehicle level, the drivetrain variants battery electric vehicle and vehicle with a gasoline engine including the auxiliary demand are validated. For each sub-item, firstly the model build-up is described in detail and secondly the validation is shown. In the validation chapter it is demonstrated that the simulated results represent realistic behaviours and it ensures that a holistic energy consumption analysis can be established with the used model build-ups.

Based on the results of the validation section and the determined design of the drivetrains overall vehicle simulation models are built up. In this context, a modular structure is used in order to simultaneously use synergy effects and ensure a maximum comparability of the drives. The modular structure used is subdivided into the four sub-groups "vehicle architecture", "mechanical and electrical drive train", "thermal drive train" and "thermal passenger cell". For the drivetrain variants battery, fuel cell range extender, fuel cell plug-in and fuel cell vehicle as well as for a vehicle with a gasoline or diesel engine, the modular structure as well as the applied operating strategies are discussed in detail. For the battery and the fuel cell vehicle a possible configuration for the forecast year 2025 is, in addition to the consideration year 2015, also described.

Based on the developed methodology, the carried-out validation and the structure of the overall vehicle models, an analysis of the overall energy consumption is done. In order to generate a reference value as a basis for comparison and to evaluate the influence of the cycles on energy consumption, different driving profiles without special auxiliary consumers are examined. Afterwards various weather conditions and their effects on the energy consumption in 2015 are discussed. Firstly, the seasonal energy demand in Germany is determined. The average energy consumption per 100 km over the trip length is evaluated for the three driving profiles urban, rural and motorway as well as the seasons winter, spring, summer and autumn. The drivetrain variants battery, fuel cell range extender, fuel cell plug-in and fuel cell vehicle as well as vehicle with gasoline or diesel engine are examined in this regard. The same analysis is then carried out for the countries of Spain and Norway. Here and following, the drivetrain variants battery and fuel cell vehicle as well as vehicle with a gasoline engine are considered for a medium segment vehicle of the European market. After evaluating the energy consumption for different European climates, an analysis of variable starting conditions is carried out. In this regard, the three starting conditions “shadow”, “heated up” and “preconditioned” are analysed exemplarily. In order to be able to assess the influence of variable weather conditions in a dedicated manner, both the warmest and coldest 1 % weather patterns and the coldest and warmest 20 % of the winter and the summer are compared with the average winter, summer and the annual overall consumption. In the following the analysis is only carried out for the country Germany. By simulating five starting times and five temperature classes per season, a database has been created that allows different user profiles and vehicle fleets to be analysed. Firstly, the energy consumption for the driving behaviour of a German private car fleet is considered. For this purpose, the driving profiles from the “Mobility in Germany” study evaluated in the methodology section are used and representative consumption figures are determined. After assessing a vehicle fleet, three user profiles are examined. A short-, a medium- and a long-distance driver is defined and the resulting energy consumption is compared. After the influence of the auxiliary consumers on the energy demand in 2015 is analysed, an investigation for the forecast year 2025 for the two drivetrain variants battery and fuel cell vehicle is carried out. The analysis is done likewise to the consideration year 2015. Firstly, the effect of different driving cycles and secondly the influence of seasonal weather conditions as well as the effect of the driving profiles of a vehicle fleet reflecting the German driving behaviour as well as the three defined user profiles are examined. German weather profiles are used therefore.

By developing the methodology, validating the components, modules as well as the overall vehicle behaviour, creating the overall vehicle simulation models and evaluating the simulation results, the influence of auxiliary consumers on the energy consumption is investigated and a realistic energy consumption is compared uniformly and fairly. In summary, the calculated results show that the additional needs of the auxiliary consumers should not be neglected. Particularly in cold conditions and in driving situations with a low average speed, the energy consumption is clearly influenced by the auxiliary load. The greater the drivetrain variants are electrified, the stronger is the secondary consumers' influence. This is partly based on a lack of waste heat and partly based on a reduced basic consumption due to the increased component's efficiency.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand in der Abteilung Vorentwicklung Brennstoffzelle in dem Team Energiesystemanalysen der Daimler AG in Kirchheim unter Teck und unter der Betreuung des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München.

An dieser Stelle möchte ich mich bei all den Menschen bedanken die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben.

Als erstes möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner von dem Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München für die Übernahme der Betreuung der Doktorarbeit und für die Unterstützung während der Entstehung der Thesis bedanken.

Zudem möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. K. Andreas Friedrich von dem Lehrstuhl Energiespeicherung der Universität Stuttgart für die Übernahme des Zweitgutachtens meinen Dank aussprechen.

Des Weiteren möchte ich mich sehr herzlich bei meinem Betreuer der Daimler AG, Herrn Dr. Jörg Wind, für das angenehme Arbeitsumfeld und die fruchtbaren Diskussionen bedanken.

Ferner gilt mein Dank meinen Studenten für ihren Beitrag zu dem Gelingen dieser Arbeit.

Besonders herzlich möchte ich mich bei meinem Doktorandenkollegen, Herrn Thomas Mayer, bedanken. Zahlreiche Diskussionen haben wesentlich zu dem Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Meinen Eltern möchte ich für das Ermöglichen meines Werdegangs Danke sagen.

Zudem möchte ich mich bei meiner Familie und bei meinen Freunden für die stetige Unterstützung und Motivation bedanken.

Von ganzem Herzen möchte ich mich bei meiner Freundin Theresa für ihr Verständnis und für ihre Geduld bedanken. Während der Doktorandenzeit hast Du mich stets unterstützt und meinen Blick nach vorne gerichtet.

Benedikt Graf-Hollweck

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	III
Danksagung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XVI
Formelverzeichnis	XVII
Formelzeichen und Abkürzungen	XVIII
1 Einleitung, Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit	1
1.1 Problemstellung, Erkenntnisstand und Motivation der Arbeit	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen der Arbeit.....	4
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	6
2 Theoretische Grundlagen	10
2.1 Tank-to-Wheel-Analyse als Teil einer Well-to-Wheel-Analyse.....	10
2.2 Fahrzyklen	11
2.3 Fahrwiderstände	14
2.4 Grundlegender Aufbau der analysierten Fahrzeugarchitekturen	17
2.5 Fahrzeugkomponenten.....	19
2.5.1 Batteriezele und Batteriesystem	19
2.5.2 Brennstoffzelle und Brennstoffzellensystem.....	24
2.5.3 Leistungselektronik	29
2.5.4 Elektromotor und elektrische Antriebseinheit	30
2.5.5 Verbrennungsmotor	34
2.5.6 Getriebe und Differenzialgetriebe	38
2.6 Thermomanagement in dem Pkw-Umfeld	39
2.6.1 Grundbegriffe und Grundlagen zu dem Wärmetransport	39
2.6.2 Klimatisierungskreislauf Pkw	41
2.6.3 Kältemittelkreisprozess	43
2.6.4 Wärmepumpensystem und elektrische Zuheizer	45
2.7 Verwendete Software für die Gesamtfahrzeugsimulation	46
3 Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs	47
3.1 Systematik für eine Ermittlung eines realitätsnahen Energiebedarfs	47
3.1.1 Nutzer-/Flottenverhalten und Fahrprofil.....	50
3.1.2 Referenzfahrzeugbildung 2015 und Referenzfahrzeugbildung 2025.....	51
3.1.3 Wetter- und Startbedingungen.....	61

3.1.4	Modularer Simulationsaufbau.....	65
3.2	Prognose der Fahrleistungs- und der Fahrwiderstandsentwicklung.....	67
3.2.1	Leistung des konventionellen Antriebsstrangs.....	67
3.2.2	Luftwiderstandsbeiwert und Stirnfläche.....	71
3.2.3	Rollwiderstandsbeiwert.....	73
3.2.4	Karosseriemasse.....	74
3.3	Prognose der Komponentenmassen und der Komponentenentwicklung.....	75
3.3.1	Batteriesystem.....	75
3.3.2	Brennstoffzellensystem.....	78
3.3.3	Wasserstofftanksystem.....	79
3.3.4	Elektrische Antriebseinheit.....	80
3.3.5	Verbrennungsmotor.....	81
3.3.6	Sonstige Massenermittlungen und Übersicht.....	82
3.4	Vorgehen für die Auslegung der Antriebe für das Prognosejahr 2025.....	83
4	Aufbau und Validierung auf Komponenten-, auf Modul- und auf Gesamtfahrzeugebene....	86
4.1	Batteriesystem.....	86
4.2	Brennstoffzellensystem/-stack.....	98
4.3	Elektrische Antriebseinheit.....	102
4.4	Verbrennungsmotor.....	106
4.5	Reifenmodell.....	116
4.6	Fahrgastzellenklimatisierung.....	119
4.7	Energiebedarf ohne Nebenverbraucher.....	124
4.8	Energiebedarf mit Nebenverbraucher.....	125
5	Aufbau und Beschreibung der Antriebsvarianten.....	126
5.1	Batteriefahrzeuge.....	126
5.1.1	Batteriefahrzeug 2015.....	127
5.1.2	Batteriefahrzeug 2025.....	137
5.2	Brennstoffzellenfahrzeuge.....	143
5.2.1	Brennstoffzellen-Range-Extender-Fahrzeug.....	143
5.2.2	Brennstoffzellen-Plug-In-Fahrzeug.....	146
5.2.3	Brennstoffzellenfahrzeug 2015 und 2025.....	147
5.3	Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor.....	151
6	Analyse des gesamtheitlichen Energiebedarfs 2015 und 2025.....	159
6.1	Betrachtungsjahr 2015.....	159
6.1.1	Fahrzyklus.....	159
6.1.2	Wetter- und Startbedingungen.....	165

6.1.2.1	Saisonaler Energiebedarf in Deutschland	166
6.1.2.2	Saisonaler Energiebedarf in Spanien und in Norwegen.....	175
6.1.2.3	Variable Startbedingungen in Deutschland, in Spanien und in Norwegen.....	180
6.1.2.4	Variable Wetterbedingungen in Deutschland	182
6.1.3	Fahrzeugflotte	185
6.1.4	Nutzerprofile.....	189
6.2	Prognosejahr 2025	194
6.2.1	Fahrzyklus.....	194
6.2.2	Saisonaler Energiebedarf in Deutschland	196
6.2.3	Fahrzeugflotte und Nutzerprofile	199
7	Schlussbetrachtung der Arbeit - Zusammenfassung und Ausblick	204
7.1	Zusammenfassung der Arbeit und Diskussion der Ergebnisse.....	204
7.2	Ableitung von Handlungsempfehlungen	208
	Literaturverzeichnis.....	XXV
	Anhang.....	XXXIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Aufbau und Zusammenhang der Arbeit	6
Abbildung 2-1 Aufbau einer Well-to-Wheel-Analyse nach [20]	10
Abbildung 2-2 Darstellung der Zertifizierungszyklen a) NEFZ nach [25] und b) WLTC nach [26]	11
Abbildung 2-3 Artemisfahrzyklen a) Innerorts, b) Außerorts, c) Autobahn nach [28] und d) im Vergleich	12
Abbildung 2-4 Übersicht über die Fahrwiderstände nach [4], Bild von [32]	14
Abbildung 2-5 Beispielhaft benötigte Leistung für die Überwindung der Fahrwiderstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit	16
Abbildung 2-6 Übersicht über verschiedene Fahrzeugarchitekturen, nach [37]	17
Abbildung 2-7 Fahrzeugbeispiele mit unterschiedlichen Antriebsarten, Bilder nach [42]–[46]	19
Abbildung 2-8 Prinzipieller Aufbau eines elektrochemischen Energiespeichers, nach [47]	20
Abbildung 2-9 Aufbau eines Batteriesystems (Batteriezelle, -modul und -system), nach [51], [52]	20
Abbildung 2-10 Aufbau eines Batteriesystems a) schematisch nach [48] und b) praktisch nach [11]	21
Abbildung 2-11 Übersicht über verschiedene Batteriekühlkonzepte: a) Luftkühlung, b) direkte Kältemittelkühlung und c) Kältemittelkühlung inkl. Kältemittelkreislauf nach [53]	22
Abbildung 2-12 Allgemeiner Aufbau einer Brennstoffzelle nach [55]	24
Abbildung 2-13 Darstellung der Spannungsverluste einer Brennstoffzelle nach [56]	25
Abbildung 2-14 Aufbau einer Membran-Elektroden-Einheit und eines Brennstoffzellenstacks nach [55]	25
Abbildung 2-15 Aufbau eines Brennstoffzellensystems inkl. einem elektrischen Antrieb nach [58]	26
Abbildung 2-16 Wirkungsgrad eines Brennstoffzellenstacks und eines Brennstoffzellensystems über der Leistung nach [58]	27
Abbildung 2-17 Prinzipieller Aufbau der Kühlkreisläufe eines Brennstoffzellensystems nach [58]	28
Abbildung 2-18 Aufbau des Wasserstofftanksystems (links) und des Brennstoffzellensystems (rechts) des Brennstoffzellenfahrzeugs Mercedes-Benz GLC F-CELL der Firma Daimler AG [60]	28
Abbildung 2-19 Schaubild der elektrischen Energiewandler nach [48]	29
Abbildung 2-20 Verschaltung der elektrischen Komponenten anhand eines BEVs nach [62]	29
Abbildung 2-21 Darstellung der Wirkweise der Lorentzkraft nach [55]	30
Abbildung 2-22 Aufbau der Feldlinien in einer Drehstrommaschine nach [55]	31
Abbildung 2-23 Betrieb einer elektrischen Maschine in vier Quadranten nach [62]	31
Abbildung 2-24 Wirkungsgradkennfeld einer PSM inkl. Leistungselektronik nach [62]	32
Abbildung 2-25 Qualitativer Verlauf des Drehmoments und der Leistung über der Drehzahl a) für einen Verbrennungs- und b) für einen Elektromotor nach [48]	32
Abbildung 2-26 Leistungsfluss und Verluste einer elektrischen Maschine nach [67]	33
Abbildung 2-27 a) Beispielhafter, schematischer Aufbau einer elektrischen Antriebseinheit inkl. deren Kühlung nach [70] und b) reale Abbildung des Elektromotors der Mercedes-Benz C-Klasse C 300 Blue-TEC HYBRID der Firma Daimler AG mit einer Leistung von 20 kW nach [71] ..	34
Abbildung 2-28 a) Triebwerk eines Hubkolbenmotors nach [72] und b) 4-Takt-Verfahren in einem p-V-Diagramm nach [72]	35
Abbildung 2-29 Gleichraum- und Gleichdruckkreisprozess in einem p-V-Diagramm nach [72]	35
Abbildung 2-30 Charakteristik eines Verbrauchskennfelds a) für einen 4-Takt-Ottomotor und b) für einen 4-Takt-Dieselmotor nach [72]	36
Abbildung 2-31 Energiebilanz eines Otto- und eines Dieselmotors bei 2 000 1/min bei 2 bar und bei 12 bar nach [62]	36
Abbildung 2-32 Beispielhafter Kühlkreislauf eines Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor	37
Abbildung 2-33 4-Zylinder-Ottomotor Mercedes-Benz M282 der Firma Daimler AG nach [76]	37

Abbildung 2-34 a) Theoretische Darstellung eines Automatikgetriebes nach [78] und b) realisiertes Automatikgetriebe Mercedes-AMG SPEEDSHIFT MCT 9G der Firma Mercedes-AMG GmbH nach [79].....	38
Abbildung 2-35 Theoretische Darstellung eines Differentials nach [78] und b) Hinterachs-Sperrdifferenzialgetriebe des Mercedes-AMG SLC 43 der Firma Mercedes-AMG GmbH nach [80].....	38
Abbildung 2-36 Beispielhafter Aufbau eines Kühlkreislaufs eines Plug-In-Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor nach [82].....	41
Abbildung 2-37 Schematische Darstellung des Klimageräts und des Luftpfads nach [83].....	42
Abbildung 2-38 Physikalische Einflussfaktoren auf die Kabinenklimatisierung nach [84], Bild von [32]	42
Abbildung 2-39 Beispielhafte Darstellung der funktionalen Anforderung und der Betriebsmodi einer Klimatisierung einer Fahrgastzelle nach [85]	43
Abbildung 2-40 Beispielhafte Darstellung a) der Komponenten eines Kältemittelkreisprozesses nach [86] und b) eines Kältemittelkreisprozesses in einem pH-Diagramm nach [86]	44
Abbildung 2-41 Beispielhafter Aufbau eines Kältemittelaggregats in einem Pkw nach [88]	45
Abbildung 2-42 Abbildung eines a) elektrischen Luft- und b) eines elektrischen Wasserheizers [91]..	46
Abbildung 3-1 Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energieverbrauchs nach [20].....	49
Abbildung 3-2 a) Verteilung der Fahrleistung über dem gesamten Tag und über alle Segmente nach [98]; Daten gefiltert aus [96] und b) Fahrzyklen Artemis Innerorts, Außerorts und Autobahn nach [28].....	50
Abbildung 3-3 Einteilung der EU-Fahrzeugklassen in die Segmente klein, mittel und groß nach [16], [95].....	51
Abbildung 3-4 Methodik für die Ermittlung vergleichbarer Fahrzeugeigenschaften für das Betrachtungsjahr 2015	52
Abbildung 3-5 Fahrleistungs- und Fahrtenverteilung für die Bestimmung der batterieelektrischen Reichweite der Plug-In- und der Range-Extender-Varianten; Daten gefiltert aus [96], [97] ..	55
Abbildung 3-6 Iteratives Auslegungstool für die Berechnung der dynamischen Anforderungen	57
Abbildung 3-7 Iteratives Auslegungstool für eine bedarfsgerechte Auslegung der Antriebe	59
Abbildung 3-8 a) Beispielhafte Darstellung des Sekanten-Verfahrens und b) beispielhafte Ermittlung der benötigten, maximalen Leistung basierend auf der in einem Zyklus benötigten Leistung nach [104].....	60
Abbildung 3-9 Vorgehensweise für die Auslegung der Antriebe für das Prognosejahr 2025	61
Abbildung 3-10 Verteilung der Fahrleistung und der Startzeit über einem Tag nach [98], Daten aus [96].....	62
Abbildung 3-11 Methodik für die Gewichtung und für die Einteilung der Wetterdaten nach [108], [112], Daten aus [110], [111]; Deutschlandkarte aus [113].....	63
Abbildung 3-12 Vergleich des Heiz- und des Kühlbedarfs der 365 zu den 20 gruppierten Wetterverläufen in dem Fahrprofil „Pendler“ nach [108]	64
Abbildung 3-13 Modularer Aufbau der Simulationsmodelle 2015 nach [115]	65
Abbildung 3-14 Historischer Verlauf der segmentbezogenen Verkaufszahlen in Europa a) alle Segmente, b) Segment 1, c) Segment 2 und d) Segment 3, Daten aus [100], Datenstand Jahr 2016	67
Abbildung 3-15 Historischer und prognostizierter Verlauf der segmentbezogenen Verkaufszahlen in dem Zeitraum 2003 bis 2028 in Europa, Daten aus [100], Datenstand Jahr 2016.....	68
Abbildung 3-16 Entwicklung der segmentspezifischen Leistung a) der Segmente 1, b) der Segmente 2, c) der Segmente 3 und d) der gewichteten Segmente 1 bis 3; Daten aus [99]	69
Abbildung 3-17 Entwicklung der segmentspezifischen Leistung in Europa, Daten des Jahres 2003 bis zu dem Jahr 2015 aus [99].....	70

Abbildung 3-18 Entwicklung a) der segmentspezifischen Stirnfläche und b) des segmentspezifischen Luftwiderstandswerts, Daten aus [38].....	71
Abbildung 3-19 Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts a) in dem Segment 1, b) in dem Segment 2, c) in dem Segment 3 und d) für die Segmente 1 bis 3, Daten aus [38], Top-10-Fahrzeuge je Segment verwendet	73
Abbildung 3-20 Historische Entwicklung und Prognose des Rollwiderstandbeiwerts, Daten auf [35], [36]	74
Abbildung 3-21 Entwicklung der segmentspezifischen Fahrzeugmasse 2003 bis 2015, Daten aus [99]	74
Abbildung 3-22 Übersicht über historische und prognostizierte reziproke Energiedichten auf Zellniveau a) BEV-, b) PHEV-, c) HEV-Zelle und d) vereinfachter Aufbau eines Batteriesystems nach [70], Daten aus [123]–[132].....	76
Abbildung 3-23 Modularer Aufbau des Batteriesystems a) Draufsicht und b) Seitenansicht	77
Abbildung 3-24 Übersicht über historische und prognostizierte reziproke Leistungsdichten a) eines Brennstoffzellensystems und b) eines Brennstoffzellenstacks, Daten aus [4], [6]–[8], [57], [123], [129], [136]–[151].....	79
Abbildung 3-25 Übersicht über historische und prognostizierte gravimetrische Energiedichten eines H ₂ -Tanksystems, Daten aus: [6], [123], [129], [139], [142], [145], [150], [152]–[159].....	80
Abbildung 3-26 a) Übersicht über historische und prognostizierte reziproke Leistungsdichten einer elektrischen Antriebseinheit in der Leistungsklasse 50 kW bis 100 kW und b) leistungsabhängige reziproke Leistungsdichten einer elektrischen Antriebseinheit in dem Betrachtungszeitraum 2014 bis 2016, Daten aus [6]–[8], [101], [123], [139], [160]–[169]	81
Abbildung 3-27 Leistungsabhängige reziproke Leistungsdichten eines Verbrennungsmotors a) Ottomotor und b) Dieselmotor, Daten aus [101].....	81
Abbildung 3-28 Entwicklung der Höchstgeschwindigkeit historische Werte a) in dem Seg-1, b) in dem Seg-2 c) in dem Seg-3 und Prognose d) Seg-1, Seg-2 und Seg-3, Daten aus [99].....	84
Abbildung 4-1 Übersicht über unterschiedliche elektrische Ersatzschaltbilder nach [172].....	86
Abbildung 4-2 Modellierung der Batterie in GT-SUITE, Bild aus [92]	87
Abbildung 4-3 Schematische Darstellung der thermischen Modellierung eines Batteriemoduls.....	87
Abbildung 4-4 Modellierung eines Batteriemoduls in GT-SUITE, Bild aus [92]	88
Abbildung 4-5 Schematischer, vollvariabler Aufbau der Modellierung eines gesamten Batteriesystems	88
Abbildung 4-6 Modellierung der Kühlmitteltemperatur bei dem Batterieaustritt in GT-SUITE, Bild aus [92]	89
Abbildung 4-7 Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Batterievalidierung.....	89
Abbildung 4-8 BEV/REEV-Batterievalidierung mit Kühlmittelmassenstrom a) Abkühlverhalten bei 0 °C, b) bei 20 °C und c) Aufwärmverhalten bei 30 °C nach [70].....	90
Abbildung 4-9 BEV/REEV-Batterievalidierung statische Lastprofile 0,5 C, 1,0 C und 2,0 C Entladung a) und b) bei 20 °C mit Kühlmittelvolumenstrom und c) und d) bei 0 °C ohne Kühlmittelvolumenstrom.....	91
Abbildung 4-10 BEV/REEV-Batterievalidierung transientes Stromprofil Autobahn bei unterschiedlichen Start- und Umgebungsbedingungen a) Zelltemperatur- und b) Kühlmitteltemperaturoentwicklung nach [70]	92
Abbildung 4-11 PHEV-Batterievalidierung mit Kühlmittelmassenstrom a) Abkühlverhalten bei 0 °C, b) bei 20 °C und c) Aufwärmverhalten bei 30 °C	94
Abbildung 4-12 PHEV-Batterievalidierung statische Lastprofile 1 C, 2 C und 5 C Entladung a) und b) bei 20 °C mit Kühlmittelvolumenstrom und c) und d) bei 0 °C ohne Kühlmittelvolumenstrom	95
Abbildung 4-13 PHEV-Batterievalidierung transientes Stromprofil Außerorts bei unterschiedlichen Start- und Umgebungsbedingungen a) Zelltemperatur- und b) Kühlmitteltemperaturoentwicklung	96

Abbildung 4-14 HEV-Batterievalidierung mit Kühlmittelmassenstrom a) Abkühlverhalten bei 0 °C und b) bei 20 °C	97
Abbildung 4-15 PHEV-Batterievalidierung statische Lastprofile 2 C, 5 C und 10 C Entladung a) und b) bei 30 °C mit Kühlmittelvolumenstrom und c) und d) bei 10 °C ohne Kühlmittelvolumenstrom	98
Abbildung 4-16 Modellierung des Brennstoffzellensystems, Bild aus [92].....	99
Abbildung 4-17 a) schematische Darstellung eines generellen Aufbaus eines Brennstoffzellenstacks nach [57] und b) detaillierte Visualisierung des Kühlmittelstroms durch die Bipolarplatten. 100	
Abbildung 4-18 Modellierung des Brennstoffzellenstacks in GT-SUITE, Bild aus [92]	100
Abbildung 4-19 Validierung des thermischen Verhaltens der Austrittstemperatur des Kühlmittels eines Brennstoffzellenstacks bei a) -10 °C, b) 20 °C und c) statischer und dynamischer Last nach [70].....	102
Abbildung 4-20 Modellierung einer Leistungselektronik in GT-SUITE, Bild aus [92]	103
Abbildung 4-21 Modellierung einer elektrischen Antriebseinheit in GT-SUITE, Bild aus [92].....	104
Abbildung 4-22 Validierung des thermischen Verhaltens der Austrittstemperatur des Kühlmittels der elektrischen Antriebseinheit bei a) einer statischen Last, b) unterschiedlichen statischen Lasten, c) statischer und dynamischer Last und d) dynamischer Last nach [70]	105
Abbildung 4-23 Modellierung des ICE-Mehr-Massen-Modells, vgl. das GT-SUITE-Template [92]	107
Abbildung 4-24 Aufbau und Modellierung der Verbrennungskennfeldanalyse, Bild aus [92]	109
Abbildung 4-25 Schematischer Aufbau des Abgasturboladers nach [170]	110
Abbildung 4-26 Validierung des Kraftstoffverbrauchs in dem NEFZ anhand verschiedener Realfahrzeuge der Segmentklassen eins bis drei mit einem Otto- bzw. mit einem Dieselmotor nach [170]	111
Abbildung 4-27 Validierung des Aufwärmverhaltens des Kühlmittels und des Öls in dem NEFZ bei einem Benzinfahrzeug a) und b) des Segments 1, c) und d) des Segments 2 und e) und f) des Segments 3 nach [170]	114
Abbildung 4-28 Validierung des Aufwärmverhaltens des Kühlmittels und des Öls in dem NEFZ bei einem Dieselfahrzeug a) und b) des Segments 1, c) und d) des Segments 2 und e) und f) des Segments 3 nach [170]	115
Abbildung 4-29 Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwerts von a) der Reifentemperatur, b) der Fahrstrecke bzw. der Fahrzeit und c) der Rollgeschwindigkeit nach [116]; d) Vorformung des Reifens nach [116]	116
Abbildung 4-30 a) Rollwiderstandsfaktor in Abhängigkeit der Reifenschultertemperatur und der Rollgeschwindigkeit nach [194] und b) schematische Darstellung der Reifenmodelle Vier- und Zwei-Massen-Modell und dessen Wärmeströme nach [170].....	117
Abbildung 4-31 Validierung des Reifenmodells a) Vergleich der stationären Reifenschultertemperatur und des Rollwiderstandsfaktors nach [170] und b) Vergleich der Rollwiderstandsleistung in dem NEFZ des verifizierten Vier-Massen-Modells mit dem aufgebauten Zwei-Massen-Modell in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur nach [170], [194]	118
Abbildung 4-32 a) Aufbau der eindimensionalen Fahrgastzelle nach [92] und nach [173] und b) Aufbau des Thermomanagements einer Fahrgastzelle	119
Abbildung 4-33 Validierung des Kabinenverhaltens bei dem Aufheizen und bei dem Abkühlen anhand einer Kabine der a) Mittelklasse und der b) Oberklasse nach [98]	121
Abbildung 4-34 a) Validierung des Aufheizverhaltens der Kabineneintritts- und der Kühlmitteltemperatur durch einen Wasser-PTC nach [201] und b) Validierung des berechneten COPs für die Kabinenklimatisierung nach [112], [173]	122
Abbildung 4-35 Validierung des zusätzlichen Energiebedarfs für die Klimatisierung anhand a) des Smart electric drive und anhand b) der Mercedes-Benz A-Klasse EV nach [98], Messwerte aus [202], [203].....	123
Abbildung 4-36 Vergleich des Energieverbrauchs ohne den Einfluss der Nebenverbraucher anhand der JEC-Referenzfahrzeuge [6]	124

Abbildung 4-37 Vergleich des gesamtheitlichen Energieverbrauchs für die Fahrzeuge a) Mercedes-Benz A-Klasse E-CELL der Firma Daimler AG und b) Volkswagen Polo Blue Motion Diesel der Firma Volkswagen AG nach [204], Messwerte aus den ÖVK-Studien [202], [203]	125
Abbildung 5-1 Schematischer Aufbau der Antriebsstrangvariante Batteriefahrzeug 2015 nach [115]	126
Abbildung 5-2 Submodell 1 - Aufbau der Fahrzeugarchitektur in GT-SUITE, Bild aus [92]	127
Abbildung 5-3 Submodell 2 - Elektrischer und mechanischer Aufbau des Antriebsstrangs der xEV-Modelle in GT-SUITE, Bild aus [92]	129
Abbildung 5-4 Modellierung der Nebenverbraucher der xEV-Modelle in GT-SUITE nach [115], Bild aus [92]	130
Abbildung 5-5 Schematischer Aufbau des Thermomanagements des Antriebsstrangs des BEVs....	131
Abbildung 5-6 Schematische Darstellung der Fahrzeugdurchströmung in einem Underhood nach [206]	131
Abbildung 5-7 a) Luftmassenstrom in Abhängigkeit der Geschwindigkeit mit und ohne eingeschaltetem Lüfter und b) approximierter, zusätzlicher Luftmassenstrom in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Lüfterleistung, nach [112]	132
Abbildung 5-8 Schematische Darstellung des angewandten Aufbaus des Batterie-Kühlmittelkreislaufs	133
Abbildung 5-9 a) Schematische Darstellung des Submodells „Fahrgastzelle thermisch“ des BEVs und b) Steuerung der Umluftrate in Abhängigkeit der Außentemperatur modifiziert nach [197]	135
Abbildung 5-10 a) Darstellung der Kabinenkomforttemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur nach [198] und b) variable Zieltemperatur des Kabinenverdampfers in Abhängigkeit des Gebläsemassenstroms und der Bypass-Klappenposition nach [112]	136
Abbildung 5-11 Schematischer Aufbau der Antriebsstrangvariante Batteriefahrzeug 2025 nach [115]	137
Abbildung 5-12 Vergleich des schematischen Aufbaus des dritten Submodells BEV 2015 mit jenem des BEVs 2025 nach [213]	138
Abbildung 5-13 Schematische Darstellung der Betriebsstrategie der Wärmepumpe 2025 nach [212]	140
Abbildung 5-14 Schematischer Aufbau der Antriebsstrangvarianten mit einem BZS nach [115].....	143
Abbildung 5-15 Schematischer Aufbau des Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor nach [115] ..	151
Abbildung 5-16 Untermodelle des Submodells 2 der Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor.....	152
Abbildung 5-17 Aufbau des Kerns des Submodells Antriebsstrang mechanisch und elektrisch des Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor in GT-SUITE, Bild aus [92].....	153
Abbildung 5-18 Übersicht Auswahl Übersetzung.....	154
Abbildung 5-19 Aufbau der Bewertung einer Übersetzungsstufe in GT-SUITE nach [112], Bild aus [92]	154
Abbildung 5-20 Aufbau der Kupplungssteuerung in GT-SUITE nach [112], Bild aus [92].....	155
Abbildung 5-21 Aufbau der Nebenverbraucher bei den ICE-Varianten in GT-SUITE, Bild aus [92] ..	155
Abbildung 5-22 Aufbau der Gaspedalregelung in GT-SUITE nach [112], [115], Bild aus [92]	156
Abbildung 5-23 Aufbau der Start-Stopp-Automatik in GT-SUITE nach [112], [115], Bild aus [92]	156
Abbildung 5-24 Schematischer Aufbau des Hochtemperaturkreislaufs eines Verbrennungsmotors nach [170]	157
Abbildung 5-25 Aufbau des Thermomanagements der Fahrgastzelle bei einem Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor	158
Abbildung 6-1 Vergleich des zyklusabhängigen Energiebedarfs der unterschiedlichen Antriebsvarianten in dem Betrachtungsjahr 2015 für a) das Segment 1, b) das Segment 2 und c) das Segment 3.....	161
Abbildung 6-2 Vergleich des Energiebedarfs in dem NEFZ mit Realfahrzeugangaben a) Segment 1, b) Segment 2 und c) Segment 3; Fahrzeugangaben der Realfahrzeuge siehe Anhang 20, Anhang 21 und Anhang 22; Daten aus [38].....	164

Abbildung 6-3 a) Luftdichte in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und b) monatlicher Durchschnittsverbrauch realer Fahrzeuge mit einem Diesel- und mit einem Batterieantrieb, Daten aus [219]	167
Abbildung 6-4 Verlauf der Nebenverbraucherleistung in dem Segment 2 in dem Außerortszyklus für a) Vormittag, GER, kältesten 20%-Winterbedingungen, ICE-G-Fahrzeug und b) Nachmittag, GER, wärmsten 20%-Sommerbedingungen, BEV	168
Abbildung 6-5 Verhältnis des Energiebedarfs mit vs. ohne Nebenverbraucher in Abhängigkeit der Fahrstrecke, der Jahreszeit und der Antriebsvariante a) Innerorts, b) Außerorts und c) Autobahn	171
Abbildung 6-6 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Innerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug	172
Abbildung 6-7 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Außerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug	173
Abbildung 6-8 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Autobahnzyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug	174
Abbildung 6-9 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Innerortszyklus unter spanischen, unter deutschen und unter norwegischen Klimabedingungen a) BEV, b) FCEV und c) ICE-G-Fahrzeug	176
Abbildung 6-10 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Innerortszyklus unter spanischen und unter norwegischen Klimabedingungen a) und b) BEV, c) und d) FCEV und e) und f) ICE-G-Fahrzeug	177
Abbildung 6-11 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Außerortszyklus unter spanischen und unter norwegischen Klimabedingungen a) und b) BEV, c) und d) FCEV und e) und f) ICE-G-Fahrzeug	178
Abbildung 6-12 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Autobahnzyklus unter spanischen und unter norwegischen Klimabedingungen a) und b) BEV, c) und d) FCEV und e) und f) ICE-G-Fahrzeug	179
Abbildung 6-13 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke des BEVs des Mittelklassensegments in dem Innerortszyklus für unterschiedliche Startbedingungen unter a) und b) deutschen, c) und d) unter spanischen und e) und f) unter norwegischen Klimabedingungen	181
Abbildung 6-14 Vergleich des Energiebedarfs unter unterschiedlichen Wetterbedingungen und unterschiedlichen Fahrprofilen a) Kurzstreckenfahrer Innerorts, b) Mittelstreckenfahrer Außerorts und c) Langstreckenfahrer Autobahn	184
Abbildung 6-15 Fahrleistungsverteilung über der Fahrstrecke für unterschiedliche Fahrprofile für a) das Segment 1, b) das Segment 2), c) das Segment 3 und d) das Segment 1 - 3, Daten gefiltert aus [96]	185
Abbildung 6-16 Vergleich des Energiebedarfs des gewichteten Zertifizierungsverbrauchs mit dem ermittelten Flottenverbrauch und realen Angaben aus [219]	186
Abbildung 6-17 Vergleich des Energiebedarfs anhand unterschiedlicher Nutzerprofile und Antriebsvarianten a) in dem Segment 1, b) in dem Segment 2 und c) in dem Segment 3..	190
Abbildung 6-18 Vergleich des zyklusabhängigen Energiebedarfs der Segmente 1 bis 3 und der Antriebsvarianten Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug in dem Prognosejahr 2025	194

Abbildung 6-19 Verhältnis des Energiebedarfs mit vs. ohne Nebenverbraucher in Abhängigkeit der Fahrstrecke, der Jahreszeit und der Antriebsvariante Innerorts, Außerorts und auf der Autobahn in dem Prognosejahr 2025	197
Abbildung 6-20 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments unter verschiedenen Zyklen und unter deutschen Klimabedingungen a), c) und e) BEV und b), d) und f) FCEV	198
Abbildung 6-21 Vergleich des Energiebedarfs und der Reichweite anhand unterschiedlicher Fahrprofile und unterschiedlicher Antriebsvarianten in dem Segment 2 in dem Prognosejahr 2025	199

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1 Ausschnitt über den Stand der Technik	3
Tabelle 2-1 Vergleich der betrachteten Fahrzyklen anhand einer Auswahl relevanter Eigenschaften. 13	
Tabelle 2-2 Einfluss der Temperatur auf eine Lithium-Ionen-Zelle nach [53]	22
Tabelle 3-1 Eigenschaften und Fahranforderungen der ermittelten, europäischen Referenzfahrzeuge	52
Tabelle 3-2 Übersicht über die statischen und dynamischen Anforderungen an die Fahrleistung für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 2	53
Tabelle 3-3 Reichweitenanforderung und Leistungsbereitstellung in dem Zertifizierungszyklus für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 2	54
Tabelle 3-4 Anforderungen an die Antriebsvarianten durch die Spitzenleistung in den Fahrprofilen ...	56
Tabelle 3-5 Anforderungen an die Antriebsvarianten durch die Durchschnittsleistung in den Fahrprofilen	56
Tabelle 3-6 Validierung des iterativen Beschleunigungstools nach [104]	58
Tabelle 3-7 Segmentspezifische, potenzielle Masseneinsparung nach [74] und [120]	75
Tabelle 3-8 Spezifisches Leistungsgewicht der Verbrennungsmotoren für das Jahr 2015	82
Tabelle 3-9 Übersicht über die Ermittlung der Komponentenmassen.....	83
Tabelle 5-1 Übersicht über die Parametrierung der BEV 2015 und der BEV 2025 Segmentfahrzeuge	128
Tabelle 5-2 Ein- und Ausgabegrößen der Wärmepumpenbetriebsstrategie 2025 nach [212].....	139
Tabelle 5-3 Darstellung der Fallunterscheidung der Wärmepumpenstrategie nach [212].....	141
Tabelle 5-4 Übersicht über die Parametrierung FC-REEV und FC-PHEV Segmentfahrzeuge 2015. 144	
Tabelle 5-5 Betriebsstrategie FCxEV Leistungsanfrage BZS Charge Depleting nach [214]	145
Tabelle 5-6 Betriebsstrategie FCxEV Leistungsanfrage BZS Charge Sustaining nach [214].....	145
Tabelle 5-7 Übersicht über die Parametrierung der FCEV 2015 und FCEV 2025 Segmentfahrzeuge	149
Tabelle 5-8 Übersicht über die Parametrierung der ICE 2015 Segmentfahrzeuge.....	152
Tabelle 6-1 Vergleich des Mehrbedarfs Artemis kombiniert gegenüber dem NEFZ-Verbrauch.....	162
Tabelle 6-2 Vergleich des rel. Energiebedarfs der Antriebsstrangvarianten in dem NEFZ	188
Tabelle 6-3 Vergleich des rel. Energiebedarfs der Antriebsstrangvarianten mit den Mobilitätsdaten einer deutschen Privat-Pkw-Flotte	188
Tabelle 6-4 Definition der Nutzerprofile Kurz-, Mittel- und Langstreckenfahrer	189
Tabelle 6-5 Rel. Verbrauch verschiedener Nutzerprofile gegenüber dem Zertifizierungsverbrauch 2015	191
Tabelle 6-6 Vergleich des Energiebedarfs 2025 mit 2015 in unterschiedlichen Zyklen.....	195
Tabelle 6-7 Vergleich des Energiebedarfs für das Betrachtungsjahr 2015 und das Prognosejahr 2025 anhand des BEVs Seg-2.....	200
Tabelle 6-8 Vergleich des Energiebedarfs für das Betrachtungsjahr 2015 und das Prognosejahr 2025 anhand des FCEVs Seg-2	201
Tabelle 6-9 Vergleich des Energiebedarfs für das Betrachtungsjahr 2015 und das Prognosejahr 2025 anhand des Verhältnisses FCEV Seg-2 zu BEV Seg-2.....	201

Formelverzeichnis

Gleichung (2-2): Berechnung der Fahrwiderstandskraft	14
Gleichung (2-2): Berechnung der Radwiderstandskraft	14
Gleichung (2-3): Berechnung der Luftwiderstandskraft	15
Gleichung (2-4): Berechnung der Steigungswiderstandskraft	15
Gleichung (2-5): Berechnung der Beschleunigungswiderstandskraft	15
Gleichung (2-6): Berechnung der Fahrwiderstandsleistung	15
Gleichung (2-7): Reaktionsgleichung Anode Brennstoffzelle	24
Gleichung (2-8): Reaktionsgleichung Kathode Brennstoffzelle	24
Gleichung (2-9): Reaktionsgleichung Brennstoffzelle	24
Gleichung (2-10): Berechnung der Lorentzkraft	30
Gleichung (2-11): Berechnung der induzierten Spannung	30
Gleichung (2-12): Möglichkeiten der Leistungsberechnung mechanisch und elektrisch	30
Gleichung (2-13): Berechnung des Wirkungsgrads via Leistung	39
Gleichung (2-14): Berechnung des Wirkungsgrads via Energie	39
Gleichung (2-15): Berechnung des COPs bzw. des EERs	39
Gleichung (2-16): Berechnung der thermischen Energie	39
Gleichung (2-17): Berechnung der spezifischen Wärmekapazität	39
Gleichung (2-18): Berechnung der inneren Energie	40
Gleichung (2-19): Berechnung der Enthalpie	40
Gleichung (2-20): Berechnung des Wärmestroms der Wärmeleitung	40
Gleichung (2-21): Berechnung des Wärmestroms der Wärmekonvektion	40
Gleichung (2-22): Berechnung des Wärmestroms der Wärmestrahlung	41
Gleichung (3-1): Berechnung mittels einer Regressionsfunktion Potenz	72
Gleichung (3-2): Berechnung des Innenwiderstands 2025	77
Gleichung (4-1): Berechnung der öltemperaturabhängigen Reibleistung	107
Gleichung (4-2): Berechnung des Kraftstoffmassenstroms	108
Gleichung (4-3): Berechnung des Wärmestroms eines Turboladers	110
Gleichung (4-4): Berechnung des Abgasmassenstroms	110
Gleichung (4-5): Berechnung der Rollwiderstandskraft in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Reifenschultertemperatur	117
Gleichung (5-1): Berechnung des Massenstroms des Lüfters	132
Gleichung (5-2): Definition des Heizpotenzials der NT-Kreisläufe	141
Gleichung (5-3): Definition der Anforderungsleistung der Fahrgastzelle	141
Gleichung (5-4): Definition der Verdichterleistung	141
Gleichung (6-1): Berechnung des utility factors basierend auf der ECE R 101	159

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

A	m^2	Anströmungsfläche
B	Vs/m^2	Magnetischer Fluss
C	J/K	Wärmekapazität
c	J/kgK	Spezifische Wärmekapazität
C	As/V	Kapazität
C	$kWh/100\ km$	Engl. consumption for 100 km; Z. Dt. Energiebedarf pro 100 km
C_p	J/K	Wärmekapazität bei konstantem Druck
C_v	J/K	Wärmekapazität bei konstantem Volumen
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
D	km	Distanz
E	J	Energie
e	-	Emissionsgrad
F	N	Kraft
g	m^2/s^2	Fallbeschleunigung
H	J	Enthalpie
h	J/kgK	Spezifische Enthalpie
H	MJ/kg	Heizwert
i	-	Übersetzungsverhältnis
I	A	Strom
J	$kg*m^2$	Massenträgheitsmoment
l	m	Länge
l	m^3	Liter
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
n	$1/min$	Drehzahl
P	W	Leistung
p	bar	Druck
Q	J	Wärme
q	W/m^2	Wärmestromdichte
\dot{Q}	J/s	Wärmestrom
r	m	Reifenhalbmesser
R	Ω	Widerstand
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
T	K	Temperatur
U	V	Spannung
U	J	Innere Energie
v	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_w	m/s	In Fahrtrichtung orientierte Windgeschwindigkeit
v_r	m/s	Rollgeschwindigkeit
W	J	Arbeit

Griechische Symbole

α	-	Wärmeübergangskoeffizient
β	-	Steigungswinkel
Δ	-	Delta, Differenz
δ	-	Luftspalt
ζ	-	Druckverlustbeiwert
η	-	Wirkungsgrad
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
μ_R	-	Rollwiderstandsbeiwert
ν	Ns/m^2	Viskosität
ρ_L	kg/m^3	Luftdichte
Σ	-	Summe

Φ	Vs	Magnetischer Fluss
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

1, 2, 3, ...	Zählindex
2015	Jahr 2015
2025	Jahr 2025
ab	Abgeführt
Anf	Anforderung
av	Engl. Average Z. Dt. Durchschnitt
B	Beschleunigung
Bat	Batteriesystem
BZS	Brennstoffzellensystem
Cu	Kupfer
D	Durchtritts
dyn	Dynamisch
e	Effektiv
eck	Eck
el	Elektrisch
EM	Elektromotor
ETC	Engl. electric turbo charger; Z. Dt. elektrischer Turbolader
FCC	Engl. fuel cell converter; Z. Dt. DC/DC-Wandler des Brennstoffzellensystems
Fe	Eisen
FW	Fahrwiderstand
FZG	Fahrzeug
G	Generator
i	Index
K	Konzentration
Kab	Kabine
KD	Kondensator
KM	Kühlmittel
Ko	Kompression
L	Luft
LA	Lastanforderung
LE	Leistungselektronik
Lo	Lorentz
M	Motor
max	Maximal
me	Engl. Mean Z. Dt. Mittel
min	Minimal
N	Normal
n	n-te
neu	Neu (nächster Zeitschritt)
NT	Niedertemperatur
O	Ohm'sche
PTC	PTC-Element (elektrischer Heizer)
R	Reibung
R	Reifen
R	Ruhe
Rad	Rad
Rev	Reversibel
Roll	Roll
S	Schließen
St	Steigung
stat	Statisch

t	Engl. time; Z. Dt. Zeit (aktuell)
Th	Thermisch
U	Umgebung
u	Unterer
UH	Engl. underhood; Z. Dt. Motorraum
v	Verluste
VD	Verdichter
VM	Verbrennungsmotor
x	x-te
Z	Zelle
z	Zusatz
Zi	Zelle innen
zu	Zugeführt
Ö	Öffnen

Konstanten

$[(...)]^c$	-	Exponent c
a	-	Multiplikator a
A_0	-	Konstante A_0
A_1	-	Konstante A_1
B_0	-	Konstante B_0
B_1	-	Konstante B_1
C	-	Konstante C
d	-	Konstante d für eine Verschiebung des Graphen nach oben bzw. nach unten
S	-	Skalierungsfaktor S
t	-	Konstante für eine Verschiebung des Graphen nach rechts bzw. nach links
σ	W/m ² K ⁴	Stefan-Boltzmann-Konstante

Abkürzungen:

A/C	Engl. air conditioning; Z. Dt. Klimaanlage
AB	Autobahn
AC	Wechselstrom
AG	Aktiengesellschaft
AO	Außerorts
Artemis	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems
ASM	Asynchronmaschine
ATS	Antriebsstrang
B	Benzin
b	Brennstoffverbrauch
BAT	Batterie
BEV	Engl. battery electric vehicle; Z. Dt. batterieelektrisches Fahrzeug
BMS	Batteriemanagementsystem
BoP	Engl. balance of plant; Z. Dt. BoP bezeichnet ursprünglich unterstützende Komponenten und Hilfssystem eines Kraftwerks. In dem Kontext des Brennstoffzellensystems zählen zu der BoP beispielsweise notwendige Pumpen, Medienleitungen und Kühler
BZ	Brennstoffzelle
BZS	Brennstoffzellensystem

CAD	Engl. computer-aided design; Z. Dt. computerunterstütztes Design
CAE	Engl. computer-aided engineering; Z. Dt. computerunterstütztes Entwickeln
CD	Engl. charge depleting (operation strategy); Z. Dt. Ladestand entladend (Betriebsstrategie)
CFD	Engl. computational fluid dynamics; Z. Dt. Numerische Strömungssimulation
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COP	Engl. coefficient of performance; Z. Dt. Leistungskoeffizient
C-Rate	Entladerate Batteriesystem
CS	Engl. charge sustaining (operation strategy); Z. Dt. Ladestand haltend (Betriebsstrategie)
D	Diesel
DC	Gleichstrom
DC/DC-Wandler	Gleichstromwandler
DIN	Deutsche Industrienorm
DOE	Engl. department of energy; Z. Dt. Energieministerium der Vereinigten Staaten
E	Eigenschaft
e ⁻	Elektron
E/E	Elektrik/Elektronik-Komponenten
EAE	Elektrische Antriebseinheit
ECE	Engl. economic-commission for Europe; Z. Dt. Europäische Wirtschaftskommission
ECU	Engl. electric control unit; Z. Dt. Steuergerät Elektrik
EEM	Engl. electric energy management Z. Dt. elektrisches Energiemanagement
EER	Engl. energy efficiency ratio; Z. Dt. Leistungskoeffizient
el.	Elektrisch
EM	Elektromotor
E-Motor	Elektromotor
EP	Extrapolation
ETC	Engl. electric turbo charger; Z. Dt. elektrischer Turbolader
EU	Europäische Union
EV	Engl. electric vehicle; Z. Dt. Elektrofahrzeug
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
F	Frühling
FA	Fahr Anforderung
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik
FC	Engl. fuel cell; Z. Dt. Brennstoffzelle
FCC	Engl. fuel cell converter; Z. Dt. DC/DC-Wandler Brennstoffzellensystem
FCEV	Engl. fuel cell electric vehicle; Z. Dt. brennstoffzellenbetriebenes Fahrzeug
FC-PHEV	Engl. fuel cell plug-in electric vehicle; Z. Dt. Brennstoffzellen-Plug-In-Fahrzeug

FC-REEV	Engl. fuel cell range extended electric vehicle; Z. Dt. Brennstoffzellen-Range-Extender-Fahrzeug
FCU	Engl. fuel cell control unit; Z. Dt. Steuergerät Brennstoffzelle
FF	Forschungsfrage
FKS-Tank	Flüssigkeitskraftstofftank
FM	Fahrzeugmasse
Fzg	Fahrzeug
Gem	Gemittelt
GFS	Gesamtfahrzeugsimulation
GG	Getriebegehäuse
GL	Groß links
GPR	Gaspedalregler
GPS	Gaspedalstellung
GR	Groß rechts
GT-SUITE	Multi physikalische Simulationssoftware der Firma Gamma Technology LLC
H	Herbst
H ⁺	Wasserstoffion
H ₂ O	Dihydrogeniumoxid – Wasser
H ₂ -Tank	Wasserstofftanksystem
HD	Historische Daten
HT	Hochtemperatur
HVAC	Engl. heating, ventilation and air conditioning; Z. Dt. Heizung, Lüftung und Klimatechnik
HWÜ	Heizungswärmeübertrager
icct	Engl. international council on clean transportation Europe; Z. Dt. internationales Gremium für sauberen Transport in Europa
ICE-D-Fahrzeug	Engl. internal combustion engine diesel; Z. Dt. Verbrennungsmotor-Diesel-Fahrzeug
ICE-G-Fahrzeug:	Engl. internal combustion engine gasoline; Z. Dt. Verbrennungsmotor-Benzin-Fahrzeug
ICE-PHEV	Engl. internal combustion engine plug-in electric vehicle; Z. Dt. Verbrennungsmotor-Plug-In-Fahrzeug
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
ika RWTH	Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University
Inc.	Engl. incorporated; Z. Dt. Namenszusatz US-amerikanische Unternehmensform Corporated
IO	Innerorts
JEC	Forschungszusammenarbeit bestehend aus dem Joint Research Centre der Europäischen Kommission, dem EUCAR (European Council for Automotive R&D) und der CONCAWE (Oil Companies' European Organisation for Environment, Health and Safety in refining and distribution)
KD	Kondensator
KF	Kennfeld
KL	Klein links
KM	Kühlmittel
Kond	Kondensator
Konv	Konvektiv
KR	Klein rechts
KSF	Kurzstreckenfahrer
L	Links
LA	Leistungsanforderung
LE	Leistungselektronik

LED	Engl. light-emitting diode; Z. Dt. Licht emittierende Diode
Li	Lithium
Li-NMC	Zellchemie Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide
Li-NMC-111	Li-NMC Zellchemie mit einem Nickel-Mangan-Kobalt-Verhältnis von 1:1:1
Li-NMC-811	Li-NMC Zellchemie mit einem Nickel-Mangan-Kobalt-Verhältnis von 8:1:1
LLC	Engl. limited liability company (USA); Z. Dt. Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH)
LLK	Ladeluftkühler
LLR	Leerlaufregler
LS	Luftspalt
LSF	Langstreckenfahrer
Ltd	Engl. limited company by shares (GB); Z. Dt. Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH)
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
LW	Ladewirkungsgrad
MEA	Engl. membran-electrode-assembly; Z. Dt. Membran-Elektroden-Einheit
MG	Modulgehäuse
MiD	Mobilität in Deutschland
MOSFET	Metall-Oxid Feldeffekttransistor
MSF	Mittelstreckenfahrer
MVP	Medium-Verteil-Platte
MW	Mittelwert
n	Stichprobengröße
N ₂ O	Distickstoffoxid (Lachgas)
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Ni	Nickel
NS	Nullstelle
NT	Niedertemperatur
NUTS	Frz.: nomenclature of territorial units for statistics; Z. Dt. Nomenklatur der Gebietseinheiten für statistische Auswertungen der Europäischen Union
NV	Nebenverbraucher
NV-PTC	Niedervolt-Luftheizer
O ₂	Dioxygen - Sauerstoff
OCV	Engl. open circuit voltage; Z. Dt. Leerlaufspannung
Opt	Optimum
OT	Oberer Totpunkt
ÖVK	Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik
PEM	Engl. proton exchange membrane; Z. Dt. Protonen-Austausch-Membran
PFC	Perfluorkohlenwasserstoffe
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
Pkw	Personenkraftwagen
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
PTC	Engl. positive temperature coefficient; Z. Dt. positiver Temperaturkoeffizient
QO	Quer oben
QU	Quer unten
R	Rechts

RW	Regressionswert
S	Sekante
S	Sommer
SD	Simulierte Daten
Seg	Segment
Seg-1	Segment 1, Segment klein
Seg-2	Segment 2, Segment mittel
Seg-3	Segment 3, Segment groß
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SM	Sub-Model
SOC	Engl. state of charge; Z. Dt. Ladezustand
St.-St.	Start-Stopp
SUV	Engl. sport utility vehicles; Z. Dt. Geländelimosine oder Sportgeländewagen
Th	Thermisch
THG	Treibhausgas
TL	Turbolader
TtW	Engl. tank-to-wheel; Z. Dt. Tank-zu-Reifen (Wirkkette Tank bis Reifen)
Tu	Turbine
UM	Umgebung Motorraum
UNECE	Engl. United Nations Economic Commission for Europe Z. Dt. Wirtschaftskommission für Europa
UR	Umluftrate
UT	Unterer Totpunkt
V	Verdichter
VBA	Visual Basic Applikation; Programmiersprache von Microsoft Office
VD	Verdampfer
VD	Validierte Daten
VDA	Verband der Automobilindustrie E.V.
VM	Verbrennungsmotor
VW	Volkswagen
W	Winter
WL	Wärmeleiter
WLP	Wärmeleitpaste
WLTC	Worldwide Harmonized Light Duty Vehicle Test Cycle
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
WS	Wärmestrom
WtT	Engl. well-to-tank; Z. Dt. Bohrloch-zu-Tank (Wirkkette Bohrloch bis Tank)
WtW	Engl. well-to-wheel; Z. Dt. Bohrloch-zu-Reifen (Wirkkette Bohrloch bis Reifen)
xEV	Elektrifiziertes Fahrzeug
XX	Modulnummer
ZD	Zeitdauer
ZW	Warburg-Impedanz
ÜH	Überhitzen

*„Es ist nicht wenig Zeit, die wir haben,
sondern es ist viel Zeit, die wir nicht nutzen.“*

Lucius Annaeus Seneca,
römischer Philosoph,
etwa 4 v. Chr. bis 65 n. Chr.

1 Einleitung, Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in dem Detail mit dem Energiebedarf von Personenkraftwagen (Pkw) unter der Berücksichtigung von Nebenverbrauchern. Basierend auf drei, den konventionellen europäischen Markt abbildenden, Referenzfahrzeugen und dessen Fahreigenschaften werden verschiedene Antriebsvarianten für das Betrachtungsjahr 2015 und für das Prognosejahr 2025 analysiert. Hierzu werden sowohl diverse Fahrzyklen als auch der Einfluss europäischer Klimarandbedingungen, repräsentiert durch eine Betrachtung der Klimata in den Ländern Spanien, Deutschland und Norwegen, evaluiert.

In dem ersten Kapitel der Arbeit werden zunächst die Problemstellung, der aktuelle Kenntnisstand und die Motivation der Arbeit dargelegt. Anschließend erfolgt eine Definition der Zielsetzung der Dissertation. Darauf aufbauend wird der gewählte Lösungsweg anhand der Struktur der Arbeit und der angewandten Vorgehensweise erläutert.

1.1 Problemstellung, Erkenntnisstand und Motivation der Arbeit

Mehr denn je ist aktuell der Klimawandel in dem Fokus vieler Diskussionen. Die Thematik der Klimaerwärmung und dessen Ursache sind aufgrund der implizierten Auswirkungen ein essenzieller Bestandteil unseres Lebens. Speziell in dem Kontext der CO₂- bzw. der Treibhausgas¹ (THG)-Diskussion wird dabei häufig der Verkehrssektor als einer der größten THG-Verursacher genannt. Nach dem „STATISTICAL POCKETBOOK 2019 EU TRANSPORT in figures“ war der Sektor „Transport“ für ca. 24,6 % der gesamten anthropogenen² THG-Emissionen in Europa in dem Jahr 2017 verantwortlich. Der Bereich „Cars“ trug hierzu etwa 43,5 % bei und emittierte somit ca. 10,7 % der europäischen THG-Ausstoßung³ in diesem Zeitraum. [1]

Da bei den klassischen Verbrennungsmotoren die Entstehung der Schadstoffe lokal erfolgt, wird diese bereits seit dem Jahr 1970, damals durch die Richtlinie 70/220/EWG der Europäischen Gemeinschaft, begrenzt [2]. Seitdem wurden die Grenzwerte der Schadstoffemissionen der Pkws sukzessive, bis zu der aktuell gültigen Schadstoffklasse Euro-Norm 6, verschärft, um diese zu reduzieren [3]. Da der stetige Wunsch der Menschen nach immer größeren und realisierbaren Entfernungen anhält [4], fossile Energieträger endlich sind und die Schadstoffbelastung sowie der Ausstoß von Treibhausgasen reduziert werden muss, sind zwingend effiziente Fahrzeugantriebe und klimaneutrale Kraftstoffe notwendig.

Mit dem Vorsatz, den genannten Gegebenheiten gerecht zu werden, hat die Bundesregierung Deutschland bereits in dem Jahr 2009 das Ziel von eine Millionen Elektroautos auf deutschen Straßen bis zu dem Jahr 2020 vorgegeben [5] und damit den aktuell stattfindenden Wandel des Automobilsektors hin zu der Elektromobilität forciert. Eine daraus resultierende, ansteigende Elektrifizierung der Fahrzeuge

¹ Treibhausgas: Gase, welche zu dem Treibhauseffekt beitragen. Beispielsweise sind die Gase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (Lachgas) (N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆), Fluorkohlenwasserstoffe (HFC) und Perfluorkohlenwasserstoffe (PFC) unter diesem Begriff zu verstehen [221].

² Anthropogen bedeutet von dem Menschen beeinflusst bzw. verursacht [222].

³ Ohne LULUCF-Emissionen (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) und internationale Seefahrt, einschließlich internationaler Luftfahrt und indirektem CO₂.

führt zu einer Erhöhung der Effizienz der Antriebe und somit zu einem geringeren Energiebedarf während der Nutzung eines Pkws. Relativ betrachtet hat eine Steigerung der Effizienz der Antriebe zu der Folge, dass der Energieaufwand der Nebenverbraucher an Bedeutung gewinnt. Bei einer Bilanzierung des Energiebedarfs und des CO₂-Ausstoßs steigt somit dessen Einfluss und dessen Wichtigkeit stark an. Die ausgeprägte Änderung der Gewichtung des zusätzlichen Leistungsbedarfs der Nebenverbraucher führt somit unweigerlich dazu, dass eine Berücksichtigung dieser für eine gesamtheitliche Bewertung des Energiebedarfs nicht mehr vernachlässigt werden darf.

In dem Rahmen dieser Dissertation wird deshalb eine vollumfängliche Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs entwickelt und auf diverse Fahrzeugantriebsvarianten angewandt. Für die Pkw-Ausführungen Batteriefahrzeug, Brennstoffzellenfahrzeug, Brennstoffzellenfahrzeug mit Plug-in-Batteriesystem, Range-Extender-Fahrzeug mit Brennstoffzellensystem und die beiden konventionellen Antriebsformen mit einem Diesel- und mit einem Ottomotor wird eine realitätsnahe Energieumsetzung für drei unterschiedlich große Fahrzeugklassen unter dem Einfluss realitätsnaher, europäischer Rahmenbedingungen analysiert. Dazu werden drei Referenzsegmente klein, mittel und groß gebildet und der Einfluss jener in Spanien, in Deutschland und in Norwegen vorherrschenden Wetterbedingungen, stellvertretend für ein warmes, für ein mediterranes und für ein kaltes europäisches Klima, untersucht. Indem der Einfluss der Nebenverbraucher strukturiert und einheitlich berücksichtigt wird, wird der folgend beschriebene, aktuelle Stand der Technik durch diese Arbeit erweitert.

Stand der Technik:

Bis dato wurde eine einheitliche Analyse des gesamtheitlichen Energiebedarfs mit einer Berücksichtigung des Einflusses der Nebenverbraucher anhand verschiedener Fahrzeugantriebsvarianten nicht, oder nur teilweise durchgeführt. Die Tabelle 1-1 auf der Seite 3 zeigt stellvertretend einen Ausschnitt über relevante Arbeiten in dem Kontext der Betrachtung des Energiebedarfs verschiedener Antriebsarten.

Eine Vielzahl der bestehenden Literatur, in der Tabelle 1-1 stellvertretend [6]–[13], verwendet eine Simulation als Methodik für eine Bewertung des Energiebedarfs. In vielen Arbeiten, wie beispielsweise in den Quellen [6]–[8], werden verschiedene Antriebsvarianten verglichen, der Energiebedarf jedoch lediglich in Zertifizierungszyklen und ausschließlich mit den dort berücksichtigten Nebenverbrauchern bewertet. Weitere Quellen, wie beispielsweise [9]–[11], beschäftigen sich in dem Gegensatz dazu detailliert mit der Modellierung des thermischen Verhaltens und des darauf basierenden, notwendigen Thermomanagements verschiedener Komponenten. Flieger [9] betrachtet beispielsweise eine Fahrzeugkabine, Unterguggenberger [10] einen Verbrennungsmotor und Hopp [11] ein Batteriesystem in dem Detail. Der Einfluss des zusätzlichen Energieaufwands für das Thermomanagement auf verschiedene Antriebsvarianten wird hierbei jedoch nicht berücksichtigt. Einige Publikationen befassen sich sowohl mit einem detaillierten Aufbau auf Komponentenebene als auch mit den Auswirkungen auf Antriebsebene. Während Tang [12] beispielsweise eine Effizienzanalyse eines Brennstoffzellenstacks bei kalten Startbedingungen und dessen Auswirkungen auf einen Brennstoffzellenantrieb analysiert, führt Haupt [13] eine gesamtheitliche Energieanalyse eines konventionellen und eines Plug-In-Antriebs durch, indem drei Fahrzyklen und sechs Temperaturbedingungen untersucht werden. In den beiden letztgenannten Arbeiten wird jeweils der Energiebedarf mit dem Einfluss der Nebenverbraucher von einer Antriebsvariante oder von zwei Antriebsvarianten betrachtet, jedoch kein Vergleich verschiedener Antriebsausführungen durchgeführt.

Unterschiedliche Quellen, beispielsweise [14] und [15], ziehen Messungen anstatt Simulationen für eine Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs heran. Lenz und Tobler [14] vermessen beispielsweise Fahrzeuge mit einem konventionellen, mit einem Plug-In-, mit einem Range-Extender- und mit einem batterieelektrischen Antrieb bei definierten Temperaturen von -20 °C bis 30 °C in 10-Kelvin-Schritten. Dabei werden sowohl unterschiedliche europäische Fahrzyklen als auch eine Stopp-and-Go-Fahrweise hinsichtlich des Energiebedarfs inkl. der Nebenverbraucherleistung untersucht. Lohse-Busch et al. [15] betrachten ebenfalls verschiedene konventionelle und elektrifizierte Antriebsvarianten. In dieser Arbeit wird der Verbrauch für drei amerikanische Fahrzyklen anhand der Temperaturen -6,7 °C, 22,2 °C und

35,0 °C vermessen und der Energiebedarf unter dem Einfluss der Nebenverbraucher ermittelt. In den beiden Publikationen wird ein gesamtheitlicher Energiebedarf für unterschiedliche Antriebsvarianten verglichen. Hierbei werden jedoch nur konstante Temperaturen herangezogen und kein Temperaturverlauf, wie beispielsweise ein Tagesverlauf, berücksichtigt. Zudem erfolgt keine Gewichtung der Auftrittswahrscheinlichkeit der Fahrscenarien und somit wird kein Mobilitätsverhalten repräsentiert.

Tabelle 1-1 Ausschnitt über den Stand der Technik

Autor	Quelle	Analysierte(r) Antriebsstrang / Komponente	Fokus der Arbeit	Verwendete Methode	Thermomanagement / Nebenverbraucher
Huss et al.	[6]	Konventionelle und alternative Antriebe	Vergleich verschiedener Antriebsvarianten eines Fahrzeugs der Mittelklasse unter Zertifizierungsbedingungen	Simulation	Berücksichtigt ausschließlich in dem Zertifizierungszyklus definierte Nebenverbraucher
Plotkin et al.	[7]				
Moawad & Rousseau	[8]				
Flieger	[9]	Fahrzeugkabine	Detaillierte Modellierung einer Fahrzeugkabine	Simulation	Berücksichtigt für eine Fahrgastzelle und angewandt auf ein BEV mit u. ohne solare Einstrahlung
Unterguggenberger	[10]	Verbrennungsmotor (VM)	Detaillierte Modellierung eines VM	Simulation	Berücksichtigt für einen VM
Hopp	[11]	Batteriesystem	Thermomanagement Batteriesystem	Simulation	Berücksichtigt für ein Batteriesystem
Tang	[12]	Brennstoffzellenstack und Brennstoffzellenantriebsstrang	Effizienzanalyse eines Brennstoffzellenstacks unter kalten Startbedingungen	Simulation	Berücksichtigt für kalte Startbedingungen ohne solare Einstrahlung
Haupt	[13]	Konventioneller und Plug-In-Antrieb	Gesamtheitliche Energieanalyse eines konventionellen und eines Plug-In-Antriebs	Simulation	Berücksichtigt für drei Fahrzyklen und sechs Temperaturbedingungen
Lenz und Tober	[14]	Konventionelle, Plug-In-, Range-Extender- und batterieelektrische Antriebe	Analyse konventioneller und elektrifizierter Antriebe inkl. deren Nebenverbraucher	Messung	Berücksichtigt für definierte Temperaturen (-20 °C bis +30 °C in 10-K-Schritten)
Lohse-Busch et al.	[15]	Konventionelle, Hybrid-, Plug-In- und batterieelektrische Antriebe	Analyse konventioneller und elektrifizierter Antriebe inkl. deren Nebenverbraucher	Messung	Berücksichtigt für definierte Temperaturen 20 °F, 72 °F und 95 °F
ika RWTH Aachen	[16]	Konventionelle Antriebe mit Technologiepaketen	CO ₂ -Reduzierungspotenzial bei Pkws und leichten Nutzfahrzeugen bis 2020	Technologische und wirtschaftliche Potenzialanalyse	Keine Berücksichtigung
ika RWTH Aachen	[17]	Konventionelle und alternative Antriebe	CO ₂ -Reduzierungspotenzial bei Pkws und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020		
Mock	[18]	Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor, Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge und Range-Extender mit Ottomotor	Marktdiffusion zukünftiger Fahrzeugtechnologien in dem Pkw-Bereich	Mehrdimensionale Technologiebewertung	Keine Berücksichtigung
Kreyenberg	[19]	Konventionelle und alternative Antriebe	Bewertung verschiedener Antriebe unter technologischer, ökologischer und Kundensicht	Technologiebewertung	Keine Berücksichtigung

Neben den Veröffentlichungen zu Simulations- und zu Messergebnissen sind in dem Rahmen einer gesamtheitlichen Energiebedarfsbewertung und -prognose auch Arbeiten sowohl mit einer technologischen und einer wirtschaftlichen Potenzialanalyse als auch mit einer mehrdimensionalen Technologiebewertung zu berücksichtigen. Für Ersteres können beispielsweise die Berichte [16] und [17] des Instituts für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen genannt werden. Während die Quelle [16] für konventionelle Antriebe das CO₂-Reduzierungspotenzial bei Pkws und leichten Nutzfahrzeugen bis zu dem Jahr 2020 untersucht, analysiert die Veröffentlichung [17] dies für konventionelle und alternative Antriebe nach dem Jahr 2020. In den beiden Berichten wird eine mögliche Entwicklung verschiedener Technologien diskutiert. Einflüsse der Nebenverbraucher werden jedoch vernachlässigt. Für Zweiteres können beispielhaft die Arbeit von Mock [18] und jene von Kreyenberg [19] zitiert werden. Dabei beschäftigt sich Mock [18] sowohl mit unterschiedlichen Antriebsvarianten und Komponentenentwicklungen als auch einer resultierenden Marktdiffusion zukünftiger Fahrzeugtechnologien in dem Pkw-Bereich, während Kreyenberg [19] konventionelle und alternative Antriebe bewertet, indem er verschiedene Antriebsvarianten technologisch, ökologisch und aus Kundensicht analysiert. In den beiden letztgenannten Veröffentlichungen wird der Einfluss der Nebenverbraucher auf den Energiebedarf vernachlässigt.

Aus einer, weitere Arbeiten umfassenden, Literaturrecherche geht hervor, dass sowohl verschiedene Antriebsvarianten ohne den Einfluss der Nebenverbraucher verglichen, Komponenten detailliert hinsichtlich deren Thermomanagement analysiert, einzelne Antriebe gesamtheitlich betrachtet, als auch Technologieentwicklungen kritisch bewertet werden. Ausstehend ist jedoch eine einheitliche Analyse des gesamtheitlichen Energiebedarfs für unterschiedliche Fahrzeugvarianten, welche den Einfluss der Nebenverbraucher segment-, antriebsstrang- und situationsspezifisch berücksichtigt.

In dieser Arbeit wird diese offene Forschungslücke geschlossen, indem eine Methodik für eine gesamtheitliche Energiebewertung entwickelt und auf verschiedene Antriebsvarianten angewandt wird.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen der Arbeit

Die Zielsetzung der Arbeit ist es, eine Methodik zu entwickeln und anzuwenden, welche es ermöglicht den gesamtheitlichen Energiebedarf verschiedener Antriebsvarianten basierend auf gleichen Gegebenheiten für unterschiedliche Antriebsvarianten und Fahrzeugklassen einheitlich zu untersuchen. Die erarbeitete Methode soll auf neu aufgebaute, holistische Simulationsmodelle angewendet und die Forschungslücke eines einheitlichen, gesamtheitlichen Vergleichs einer realitätsnahen Energieumsetzung für unterschiedliche Antriebsvarianten geschlossen werden. In dem Kontext dieser Arbeit werden deshalb die folgenden beschriebenen Forschungsfragen beantwortet.

1. **„Welchen Einfluss haben variierende Fahrbedingungen in Form verschiedener Fahrzyklen auf den Energiebedarf unterschiedlicher Antriebsvarianten?“**

Die erste Forschungsfrage widmet sich dem Energiebedarf variierender Fahrbedingungen ohne den Einfluss zusätzliche Nebenverbraucher. Hierbei werden stellvertretend für variierende Fahrbedingungen verschiedene Fahrzyklen hinsichtlich des Energiebedarfs verglichen, um deren Unterschiede aufzuzeigen und um in dem Folgenden den Einfluss der Nebenverbraucher je Fahrbedingung basierend auf diesen bewerten zu können. Mit der ersten Forschungsfrage wird somit neben der Analyse des Einflusses der Fahrbedingungen ein Referenzwert je Fahrbedingung geschaffen.

2. **„Wie verändert sich der Energiebedarf verschiedener Antriebsstrangkonfigurationen unter der Berücksichtigung des zusätzlichen Energieaufwands, verursacht durch eine real auftretende Nebenverbraucherleistung für unterschiedliche Jahreszeiten und für unterschiedliche europäische Klimabedingungen?“**

Basierend auf den Erkenntnissen des Energiebedarfs verschiedener Fahrbedingungen wird mittels der zweiten Fragestellung der Einfluss der Nebenverbraucher untersucht. Dabei wird der Einfluss der Ne-

benverbraucher für die unterschiedlichen Jahreszeiten Winter, Frühling, Sommer und Herbst, analysiert und die Wetterbedingungen der Länder Spanien, Deutschland und Norwegen, stellvertretend für ein warmes, mildes und kaltes europäisches Klima berücksichtigt.

3. „Welchen Einfluss haben extreme Wetterbedingungen auf den Energiebedarf der Fahrzeugtopologien Batterie-, Brennstoffzellen- und Benzinfahrzeug?“

Neben dem Einfluss der saisonalen Jahreszeiten wird die dritte Forschungsfrage gelöst, um den Einfluss von sehr kalten und sehr warmen Wetterbedingungen auf verschiedene Antriebsvarianten zu bewerten. Das Beantworten dieser Forschungsfrage dient unter anderem dem Zweck, die maximale Einschränkung der fahrbaren Reichweite alternativer Antriebe besser zu beurteilen.

4. „Wie wirken sich unterschiedliche Nutzerprofile und das Fahrverhalten der deutschen Privat-Pkw-Fahrzeugflotte auf den Energiebedarf aus?“

Bei dem Lösen der Forschungsfragen nach dem Einfluss saisonaler und extremer Wetterbedingungen wird eine Gewichtung eines Fahrprofils mit verschiedenen Startzeiten, Wegstrecken und Streckenprofilen nicht berücksichtigt. Diese Gegebenheit wird mit der vierten Forschungsfrage adressiert. Hierbei werden zunächst verschiedene Nutzerprofile und anschließend das Fahrverhalten der deutschen Privat-Pkw-Fahrzeugflotte hinsichtlich des Energiebedarfs analysiert. Die Untersuchung Ersteres dient dazu, für unterschiedliche Nutzer einen realitätsnahen Energiebedarf je Antriebsvariante aufzuzeigen und somit eine nutzerspezifische Bewertung zu ermöglichen. Die Analyse Zweiteres wird durchgeführt, um den Energiebedarf der deutschen Privat-Pkw-Flotte zu repräsentieren und einen Vergleich dessen, basierend auf verschiedenen Antriebsvarianten, zu ermöglichen.

5. „Wie könnte sich der Energiebedarf für die beiden Antriebsvarianten Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug bis zu dem Jahr 2025 entwickeln?“

Abschließend wird für die beiden Antriebsvarianten Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug eine Prognose des Energiebedarfs für das Jahr 2025 durchgeführt und die fünfte Forschungsfrage gelöst. Die durchgeführte Prognose dient dem Zweck den zukünftigen, realitätsnahen Energiebedarf für die beiden Antriebsvarianten zu bewerten und für weitere strategische Entscheidungen bereitzustellen.

Um die beschriebenen Forschungslücken zu schließen, werden die folgenden Punkte realisiert. Zunächst wird eine einheitlich anwendbare Methodik für die Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs verschiedener Antriebsvarianten und Fahrzeuggrößen entwickelt. Des Weiteren werden gesamtheitliche, skalierbare und schnell anpassbare Gesamtfahrzeugsimulationsmodelle für die Antriebsvarianten Batterie-, Brennstoffzellen-, Brennstoffzellen-Plug-In-, Brennstoffzellen-Range-Extender- und konventionelles Diesel- und Benzinfahrzeug für drei, den europäischen Markt abbildenden, Fahrzeugklassen klein, mittel und groß aufgebaut. Zudem wird eine Prognose der technologischen Entwicklung relevanter Komponenten- und Fahrzeugparametern durchgeführt. Anschließend werden die verwendeten Simulationsmodelle auf Komponenten-, auf Modul- und auf Gesamtfahrzeugebene validiert. Folgend werden die Forschungsfragen beantwortet, indem der Energiebedarf verschiedener Fahrzeugvarianten in unterschiedlichen Fahrzyklen (NEFZ⁴, WLTC⁵ und Artemis⁶ Innerorts, Außerorts, Autobahn und kombiniert) untersucht, der Einfluss des Nebenverbrauchs anhand verschiedener europäischer Klimaregionen (Spanien, Deutschland und Norwegen) betrachtet, der Energiebedarf inkl. Nebenverbraucher für unterschiedliche Nutzerprofile und das deutsche Fahrverhalten privater Pkw-Halter analysiert und der gesamtheitliche Energieverbrauch der alternativen Antriebsformen Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug der Mittelklasse für das Jahr 2025 prognostiziert wird.

⁴ NEFZ: Akronym: Neuen Europäeischen Fahrzyklus.

⁵ WLTC: Akronym: Worldwide Harmonized Light Duty Vehicle Test Cycle.

⁶ Artemis: Akronym: Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die Abbildung 1-1 gibt die Struktur der Arbeit und den Zusammenhang der einzelnen Kapitel wieder. Ferner leitet die Darstellung den Bedarf nach einer Entwicklung einer Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs unter realen Rahmenbedingungen und dessen Anwendung auf verschiedene Pkw Antriebsvarianten und den angewandten Lösungsaufbau übersichtlich her. In dem Folgenden werden der Aufbau und die Vorgehensweise der Arbeit detailliert beschrieben.

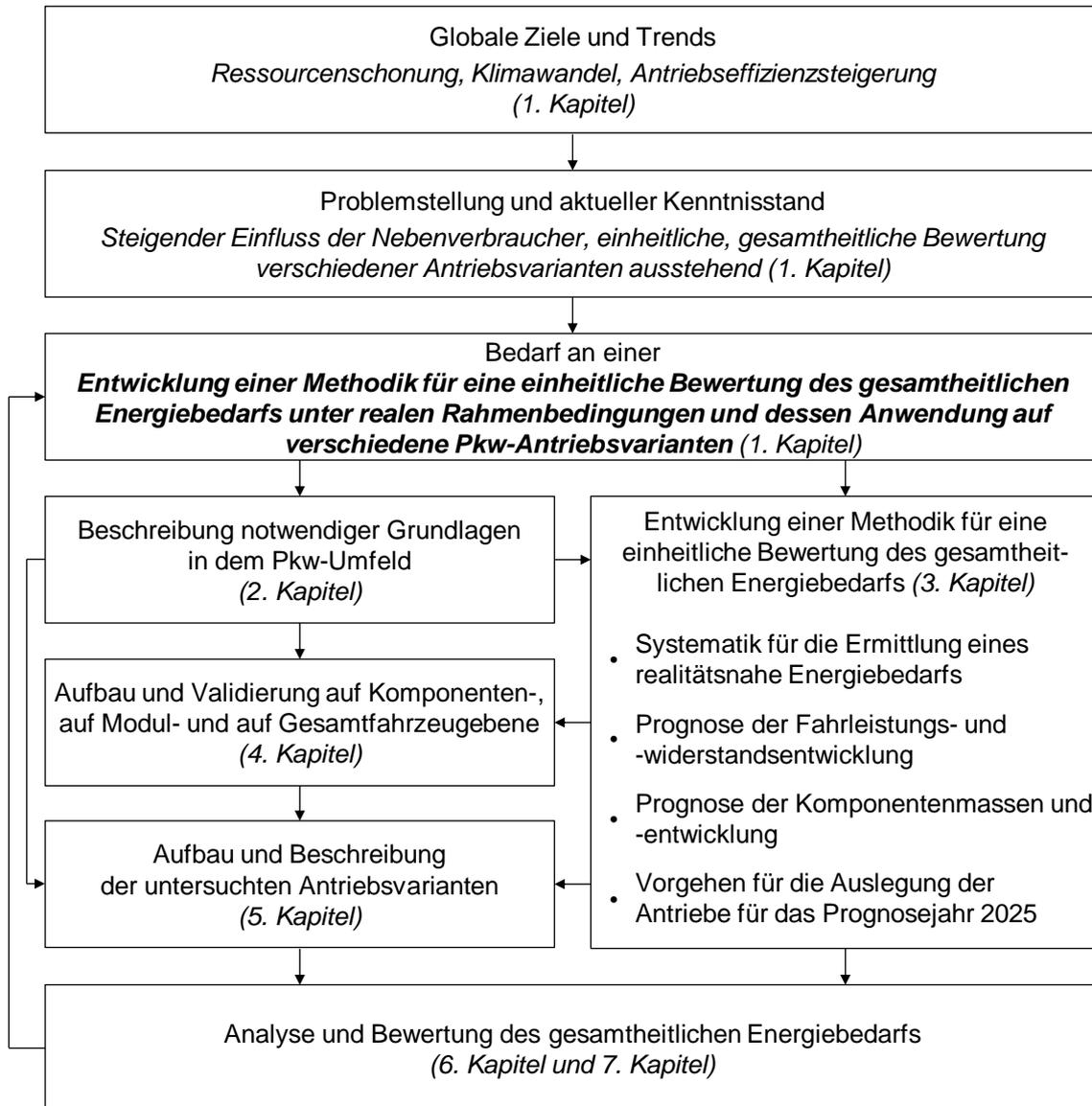


Abbildung 1-1 Aufbau und Zusammenhang der Arbeit

In dem **1. Kapitel** „*Einleitung, Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit*“ wird, basierend auf den globalen Zielen und Trends – Ressourcenschonung, Klimawandel und Antriebseffizienzsteigerung – und dem aktuellen Kenntnisstand, die Problemstellung hergeleitet und ein Bedarf nach einer Entwicklung einer Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs unter realen Rahmenbedingungen und dessen Anwendung auf verschiedene Pkw Antriebsvarianten aufgezeigt.

In dem **2. Kapitel** „*Theoretische Grundlagen*“ werden zunächst jene für das Verständnis der Arbeit und der Beantwortung der Forschungsfragen benötigte theoretische Grundlagen beschrieben. Dazu werden als Erstes die Rahmenbedingungen einer Tank-to-Wheel-Analyse, die berücksichtigten Fahrzyklen, die

Ermittlung der Fahrwiderstände eines Pkws und der grundlegende Aufbau verschiedener Antriebsvarianten erörtert. Die Beschreibung der genannten Unterpunkte dient dazu den Kontext der Arbeit einzugrenzen, die verwendeten Fahrzyklen zu kennen, die notwendigen Fahrwiderstände für eine Berechnung des Energiebedarfs zu verstehen und den grundlegenden Aufbau der Antriebsvarianten zu sehen. Auf diese Punkte folgend werden jene in den verschiedenen Antriebsformen verbaute Fahrzeugkomponenten beschrieben. Der Aufbau und die Funktionsweise der einzelnen Komponenten des Antriebsstrangs werden dabei erklärt. In diesem Kontext wird das Batterie- bzw. das Batteriesystem, die Brennstoffzelle bzw. das Brennstoffzellensystem, die Leistungselektronik, der Elektromotor und der Verbrennungsmotor, das Getriebe und das Differenzialgetriebe beschrieben. In einem weiteren Unterpunkt der theoretischen Grundlagen werden Anfangserkenntnisse des Thermomanagements erklärt. In diesem Abschnitt werden zunächst die Grundlagen und Grundbegriffe des Wärmetransports erläutert, anschließend ein Klimatisierungskreislauf eines Pkws beschrieben, folgend die Funktionsweise eines Kältemittelkreisprozesses dargelegt und abschließend ein Wärmepumpensystem und ein elektrischer Zuheizung beschrieben. Dabei werden die Grundlagen des Thermomanagements erklärt, um eine Bewertung des Einflusses der durch das Thermomanagement verursachten Nebenverbraucher zu ermöglichen. Final wird die eingesetzte Simulationssoftware GT-SUITE kurz vorgestellt. Die Beschreibung der notwendigen Grundlagen in dem Pkw-Umfeld dient den darauffolgenden Kapiteln 3, 4 und 5, indem der benötigte, theoretische Kenntnisstand dargelegt wird.

In dem **3. Kapitel** „*Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs*“ wird die in dieser Arbeit entwickelte und angewandte Methodik für eine gesamtheitliche Bewertung verschiedener Antriebsvarianten beschrieben. Dieser Abschnitt der Arbeit ist in die vier Unterpunkte „Systematik für eine Ermittlung eines realitätsnahen Energiebedarfs“, „Prognose der Fahrleistungs- und der Fahrwiderstandsentwicklung“, „Prognose der Komponentenmassen und der Komponentenentwicklung“ und „Vorgehen für die Auslegung der Antriebe für das Prognosejahr 2025“ unterteilt. In dem ersten Gliederungspunkt wird der holistische Ansatz für eine Ermittlung des gesamtheitlichen Energiebedarfs erläutert. Dabei wird auf die Feststellung des Nutzerverhaltens, die Definition der Fahrprofile, die Bildung von vergleichbaren Referenzfahrzeugen, die Erfassung von repräsentativen Wetter- und Startbedingungen und auf den Aufbau eines modularen Gesamtfahrzeugsimulationsmodells eingegangen. Darauffolgend wird die Vorgehensweise der durchgeführten Prognose der Fahrleistungs- und der Fahrwiderstandsentwicklung beschrieben. Hierbei wird differenziert die Entwicklung der Leistung konventioneller Antriebe, des Luftwiderstandsbeiwerts und der Stirnfläche, des Rollwiderstandsbeiwerts und der Karosseriemasse dokumentiert und analysiert. Anschließend erfolgt eine Prognose der Entwicklung der Komponenten. In diesem Unterpunkt wird sowohl auf das Batterie-, das Brennstoffzellen- und das Wasserstofftankensystem als auch auf die elektrische Antriebseinheit, den Verbrennungsmotor und auf sonstige Massenermittlungen eingegangen. In dem Zuge dessen wird sowohl das Vorgehen für die Ermittlung der spezifischen Gewichtsichten in Abhängigkeit des Betrachtungsjahrs und der Komponenteneigenschaft, beispielsweise die Leistung eines Elektromotors oder die Batteriekapazität und der Zelltyp eines Batteriesystems als auch eine Entwicklung der Effizienz einzelner Komponenten diskutiert. Abgeschlossen wird das Kapitel der angewandten Methodik mit einer Beschreibung der Vorgehensweise für die Ermittlung der Eingangsgrößen für eine Auslegung der Antriebe für das Prognosejahr 2025. Dabei werden Prämissen, welche anhand einer Prognose der Leistungskennwerte eines äquivalenten Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor und einer Definition verschiedener Fahrzeugreichweiten alternativer Antriebsvarianten ermittelt werden, herangezogen. In dem 3. Kapitel wird somit die Methodik für eine gesamtheitliche Bewertung verschiedener Antriebsvarianten erarbeitet. Die festgestellten Erkenntnisse und die neu entwickelte Methodik dienen als Eingangsgrößen für den Abschnitt 4, den Abschnitt 5 und den Abschnitt 6.

In dem **4. Kapitel** „*Aufbau und Validierung auf Komponenten-, auf Modul- und auf Gesamtfahrzeugebene*“ werden der Aufbau, die Modellierung und die Validierung, zunächst auf Komponenten-, anschließend auf Modul- und abschließend auf Gesamtfahrzeugebene beschrieben und dokumentiert. Anfänglich werden die Modellierung und die Validierung des Batteriesystems, des Brennstoffzellensystems,

der elektrischen Antriebseinheit und des Verbrennungsmotors auf Komponentenebene gezeigt. Anschließend wird der Aufbau des verwendeten Reifenmodells für eine Berücksichtigung der Einflüsse Reifentemperatur und Rollgeschwindigkeit erklärt und die durchgeführte Validierung beschrieben. Darauf folgend wird das Modul Fahrgastzellenklimatisierung diskutiert. Hierbei wird ebenfalls der Aufbau, die Modellierung und anschließend die Validierung dokumentiert. In dem Speziellen wird auf das Aufheizverhalten der Fahrgastzelle, auf den Energiebedarf bei dem Heizen und bei dem Kühlen und auf das Zusammenspiel des Klimatisierungskreislaufs eingegangen. Nach der Validierung der Einzelkomponenten und der Module Reifen und Fahrgastzelle wird der Fahrzeugverbrauch verschiedener Antriebsvarianten ohne den Einfluss der Nebenverbraucher validiert. Hierzu werden die in der JEC⁷-Studie [6] untersuchten Fahrzeugvarianten BEV⁸, FCEV⁹, FC-PHEV¹⁰, FC-REEV¹¹, ICE-G¹² und ICE-D¹³ nachmodelliert, simuliert und mit den Ergebnissen der Studie verglichen. Abschließend wird der gesamtheitliche Energiebedarf anhand eines vermessenen Batterie- und eines Benzinfahrzeugs bei unterschiedlichen Temperaturen und Fahrprofilen validiert. Die entsprechenden Fahrzeuge werden nachmodelliert, simuliert und die gesamtheitlichen Energieverbräuche in Bezug gesetzt. In dem 4. Kapitel wird die Modellierung validiert und eine Basis für das 5. Kapitel geschaffen.

Nach dem der Aufbau der Komponenten und der Module und die durchgeführte Validierung erörtert ist, folgen in dem **5. Kapitel** „*Aufbau und Beschreibung der Antriebsvarianten*“ die Erklärung des Aufbaus und die Beschreibung der Antriebsvarianten. Hierbei wird systematisch so vorgegangen, dass zunächst das rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeug und anschließend, aufsteigend nach der Brennstoffzellenleistung, das Brennstoffzellen-Range-Extender-, das Brennstoffzellen-Plug-In- und das Brennstoffzellenfahrzeug erläutert werden. Auf die Beschreibung der alternativen Antriebe folgend, wird auf die beiden konventionellen Antriebsvarianten mit einem Otto- und mit einem Dieselmotor eingegangen. Bei der Deskription der Antriebsvarianten werden jeweils die vier Unterpunkte „Fahrzeugarchitektur“, „Antriebsstrang mechanisch und elektrisch“, „Antriebsstrang thermisch“ und „Fahrgastzelle thermisch“ erklärt. Für jede Antriebsvariante wird dabei das Zusammenspiel der einzelnen Module und die angewandte Betriebsstrategie beschrieben. Zusammen mit der, in dem 3. Kapitel, erarbeiteten Methodik werden die in dem 5. Kapitel aufgebauten Antriebsstränge simuliert, um in dem nachfolgenden 6. Kapitel eine Analyse und eine Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs durchzuführen.

In dem **6. Kapitel** „*Analyse des gesamtheitlichen Energiebedarfs 2015 und 2025*“ werden die beschriebenen Antriebsvarianten detailliert untersucht und kritisch diskutiert. Dabei werden verschiedene Auswirkungen auf den Energiebedarf untersucht. Zunächst wird der Einfluss verschiedener Fahrzyklen mit lediglich essentiellen Nebenverbrauchern betrachtet, um den Effekt unterschiedlicher Fahrwiderstände aufzuzeigen. Anschließend wird die, in dem 3. Kapitel neu entwickelte, Methode für eine Ermittlung eines gesamtheitlichen Energiebedarfs angewandt und die Auswirkungen verschiedener Wetterbedingungen analysiert. Hierbei wird der saisonale Energiebedarf in Spanien, in Deutschland und in Norwegen betrachtet und respektive der Einfluss einer warmen, einer milden und einer kalten europäischen Klimaregion antriebsstrangspezifisch festgestellt. Zusätzlich werden die wärmsten bzw. die kältesten ein Prozent der Wetterprofile der jährlichen deutschen Wetterbedingungen des Sommers bzw. des Winters betrachtet, um zusätzlich die Auswirkung extremer Rahmenbedingungen zu untersuchen. Die extremen Gegebenheiten werden dafür separat simuliert und deren Ausprägungen auf verschiedene An-

⁷ JEC: JEC ist ein Akronym und steht für eine Forschungszusammenarbeit bestehend aus dem Joint Research Centre der Europäischen Kommission, dem EUCAR (European Council for Automotive R&D) und der CONCAWE (Oil Companies' European Organisation for Environment, Health and Safety in refining and distribution).

⁸ BEV: engl. battery electric vehicle; z. Dt. batterieelektrisches Fahrzeug.

⁹ FCEV: engl. fuel cell electric vehicle; z. Dt. Brennstoffzellenbetriebenes Fahrzeug.

¹⁰ FC-PHEV: engl. fuel cell plug-in electric vehicle; z. Dt. Brennstoffzellen-Plug-In-Fahrzeug.

¹¹ FC-REEV: engl. fuel cell range extended electric vehicle; z. Dt. Brennstoffzellen-Range-Extender-Fahrzeug.

¹² ICE-G: engl. internal combustion engine gasoline; z. Dt. Verbrennungsmotor-Benzin-Fahrzeug.

¹³ ICE-D: engl. internal combustion engine diesel; z. Dt. Verbrennungsmotor-Diesel-Fahrzeug.

triebsvarianten aufgezeigt. Über die angewandte Methodik und die Berücksichtigung eines nutzerspezifischen Fahrverhaltens ist zudem eine Betrachtung des Energiebedarfs von individuellen Fahrprofilen möglich. Mit dem Zweck dies für unterschiedliche Nutzer exemplarisch aufzuzeigen werden für einen Kurz-, einen Mittel- und einen Langstreckenfahrer drei Fahrprofile, welche jeweils ein wöchentliches Fahrmuster repräsentieren, definiert, der nutzerspezifische Energiebedarf ermittelt und antriebsübergreifend verglichen. Anschließend wird der Energiebedarf, bezogen auf ein ermitteltes Fahrverhalten der deutschen Privat-Pkw-Flotte, analysiert. Dabei wird eine Verteilung der Fahrstrecke, der Fahrzeit und des Fahrprofils segmentspezifisch herangezogen. Der Energiebedarf je Fahrsituation wird gemäß der Fahrleistungsverteilung je Fahrzeugsegment zu einem Flottenverbrauch gewichtet. Aus dem daraus ermittelten Ergebnis lässt sich näherungsweise ein Energieverbrauch einer nach deutschem Fahrverhalten aufgebauten Flotte abbilden und antriebsspezifisch vergleichen. Abschließend wird in der Auswertung der Einflüsse auf den Energiebedarf, ein Ausblick auf dessen Entwicklung anhand der beiden Antriebsvarianten BEV und FCEV gegeben. Die beide Fahrzeugvarianten werden in diesem Zusammenhang hinsichtlich des Einflusses der Fahrzyklen, des saisonalen Energiebedarfs in Deutschland, des Nutzerprofils und des Fahrverhaltens einer Fahrzeugflotte untersucht und eine mögliche Entwicklung des gesamtheitlichen Energiebedarfs für das Prognosejahr 2025 aufgezeigt.

In dem finalen und abschließenden **7. Kapitel** „*Schlussbetrachtung der Arbeit - Zusammenfassung und Ausblick*“ wird die Arbeit durch ein Fazit abgerundet. Dabei wird das Werk zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Untersuchungsmöglichkeiten gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

Der folgende Abschnitt erläutert Grundlagen der Arbeit. Die darin beschriebenen Sachverhalte werden gesamtheitlich und detailliert erörtert. An notwendigen Stellen wird auf eine weiterführende Fachliteratur verwiesen. Der Grundlagenteil gliedert sich in die Abschnitte „Tank-to-Wheel-Analyse als Teil einer Well-to-Wheel-Analyse“, „Fahrzyklen“, „Fahrwiderstände“, „Grundlegender Aufbau der analysierten Fahrzeugarchitekturen“ und „Fahrzeugkomponenten“ sowie in einen weiteren Abschnitt, welcher sich dem Thermomanagement in dem Pkw-Umfeld widmet. Zusätzlich zu den theoretischen Grundlagen wird abschließend die Simulationssoftware GT-SUITE kurz vorgestellt.

2.1 Tank-to-Wheel-Analyse als Teil einer Well-to-Wheel-Analyse

Bei einer Well-to-Wheel-Analyse (WtW) handelt es sich um eine gesamtheitliche Betrachtung der Kraftstoffbereitstellung und der Kraftstoffumsetzung - in dieser Arbeit in dem Kontext der Pkw. Als Bewertungskriterium dienen der Energieverbrauch sowie die Umweltwirkung. Für Letzteres wird oftmals ein CO₂-Äquivalent¹⁴ herangezogen. Eine WtW-Analyse gliedert sich in die Bewertungsbereiche Well-to-Tank (WtT) und Tank-to-Wheel (TtW) und ermöglicht eine differenzierte Untersuchung verschiedener Antriebsvarianten. Die erstgenannte Betrachtung berücksichtigt den Pfad der Energiebereitstellung von den Primärenergieträgern bis in den Tank bzw. bis zu der Ladestation, während der letztgenannte Bereich die Energieumsetzung während des Fahrzeugbetriebs untersucht. Die Abbildung 2-1 stellt den Zusammenhang der verschiedenen Analysen grafisch dar.

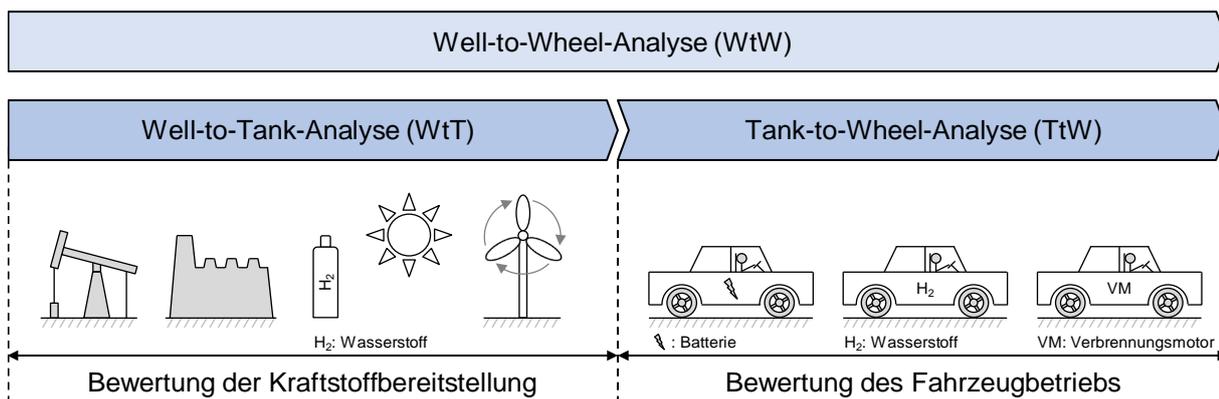


Abbildung 2-1 Aufbau einer Well-to-Wheel-Analyse nach [20]

Die Aufteilung in eine WtT- und in eine TtW-Analyse ermöglicht, eine separate Bewertung des Energiebedarfs und der Umweltwirkung für die beiden Betrachtungsbereiche. Diese Unterteilung ist sowohl bei der Einschätzung lokal emissionsfreier Antriebe als auch für die Bewertung konservativer Antriebe essenziell. Bei Ersteren ist die Energie- und die CO₂-Bilanz stark von der Energiebereitstellung abhängig, da ein rein elektrischer Fahrzeugbetrieb äußerst geringe Emissionen¹⁵ verursacht. Bei Zweiteren ist eine CO₂-Gutschrift in der Energiebereitstellungskette möglich. Deshalb muss auch hier differenziert werden. Für eine Beurteilung während des Fahrzeugbetriebs wird üblicherweise der gültige Zertifizierungszyklus als Grundlage der Verbrauchsermittlung herangezogen. Für das Betrachtungsjahr 2015 dient bei dieser Herangehensweise der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) und für das Prognosejahr 2025 wird der Worldwide Harmonized Light Duty Vehicle Test Cycle (WLTC), für die untersuchte Region Europa, angenommen. Als weiterführende Fachliteratur sind, speziell für die Automobilindustrie geltend, die Berichte der Europäischen Kommission zu empfehlen, beispielsweise [6], [21] und [22].

¹⁴ Mit dem CO₂-Äquivalent wird die Klimawirkung unterschiedlicher Treibhausgase auf die Basis von Kohlendioxid (CO₂) vereinheitlicht, beispielsweise kann damit Methan (CH₄) oder Lachgas (N₂O) in dem Kontext zu der Kohlenstoffdioxid-Klimawirkung bewertet werden.

¹⁵ Bei elektrisch angetriebenen Pkws wird lediglich Feinstaub, beispielsweise durch den Abrieb der Reifen oder der mechanischen Bremsen, lokal emittiert.

2.2 Fahrzyklen

Das Unterkapitel „Fahrzyklen“ geht zunächst auf jene Fahrzyklen ein, welche der Zertifizierung in Europa dienen. Dies betrifft den, seit dem Jahr 1992 eingesetzten, NEFZ, und den, seit dem Jahr 2017 relevanten, WLTC. Letztgenannter löste den NEFZ als Zertifizierungszyklus in Europa ab. Nach der Beschreibung der Zertifizierungszyklen folgt eine Darstellung der drei Artemiszyklen Innerorts, Außerorts und Autobahn, welche für die Gesamtfahrzeuganalyse als Grundlage herangezogen werden. Abschließend werden die vorgestellten Fahrprofile anhand relevanter Kriterien gegenübergestellt.

Fahrzyklus NEFZ – Neuer Europäeischer Fahrzyklus:

Die ersten Abgasnormen, welche zu der Richtlinie 70/220/EWG und dessen Fahrzyklus führten, wurden Ende der 1960er Jahre beschlossen [2]. Auf dem damals verwendeten Testzyklus aufbauend, wurde in dem Jahr 1991 der NEFZ erstellt und ab dem Jahr 1992 für die Zertifizierung herangezogen [23]. Bis zu dem Jahr 2017 diente dieser Zyklus in Europa der Zertifizierung von Pkws und somit der offiziellen Bewertung des Kraftstoffverbrauchs. Die Abbildung 2-2 a) zeigt den damals verwendeten, synthetisch aufgebauten Zertifizierungszyklus. Dieser besteht aus vier abzufahrenden Stadtfahrten gefolgt von einer Überlandfahrt. In den vier Stadtfahrten sind die Geschwindigkeiten 15 km/h, 32 km/h, 50 km/h und 35 km/h vorgegeben. Die zwischen den gefahrenen Abschnitten liegenden Standzeiten repräsentieren Ampelphasen. Der abschließende Zyklusabschnitt spiegelt eine Fahrt auf einer Bundesstraße bzw. auf einer Autobahn wider. In diesem Bereich wird eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h erreicht. Über den gesamten Zertifizierungszyklus wird in 1 180 s eine Fahrstrecke von ca. 11 km gefahren, was einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 33,6 km/h entspricht. [24], [25]

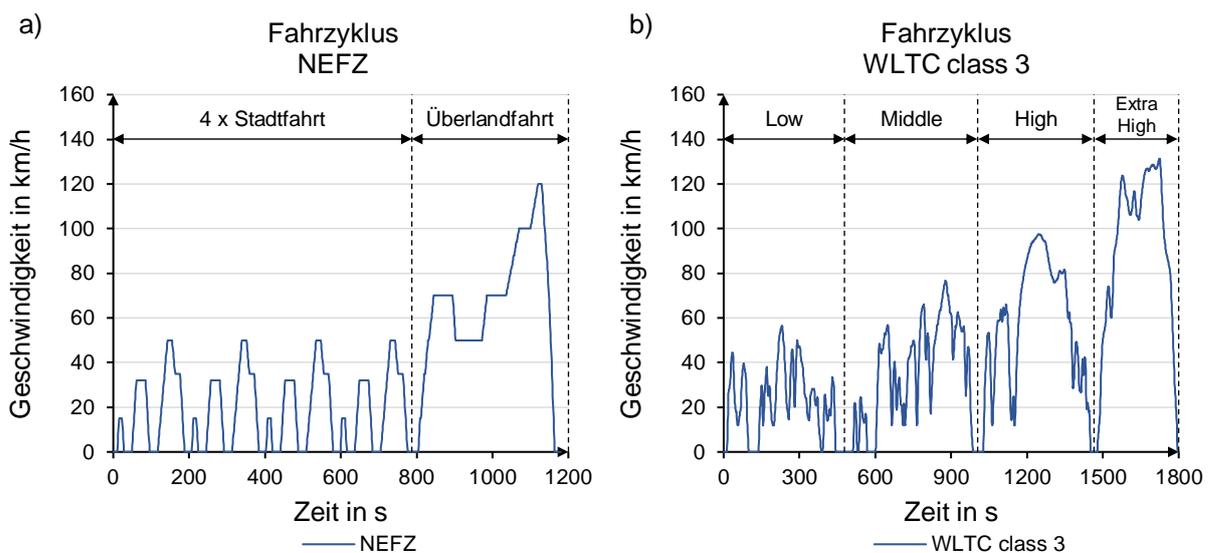


Abbildung 2-2 Darstellung der Zertifizierungszyklen a) NEFZ nach [25] und b) WLTC nach [26]

Fahrzyklus WLTC – Worldwide Harmonized Light Duty Vehicle Test Cycle:

Der WLTC wurde in dem Jahr 2007 in Genf durch die UNECE¹⁶ beschlossen und wird seit dem Jahr 2017 in Europa verwendet. Ziel des neuen Fahrzyklus war ursprünglich die Zertifizierungszyklen weltweit zu harmonisieren und den Testaufwand sowohl für die Automobilhersteller als auch für die Zertifizierungsbehörden zu reduzieren. Zudem sollte mittels des Wechsels des Zykluses, speziell für Europa geltend, dieser einen in dem Vergleich zu dem NEFZ realitätsnäheren Verbrauchswert erzielen. Die weltweite Harmonisierung der Testzyklen wird jedoch nicht vollständig erreicht, da unter anderem die USA die Einführung des WLTCs nicht mehr verfolgen. [27] Für die Erstellung des Geschwindigkeitsprofils wurden reale Fahrdaten aus teilnehmenden Ländern ermittelt und statistisch ausgewertet. Insgesamt wurden Fahrdaten aus 14 Ländern aus den drei Kontinenten Asien, Europa und Nordamerika

¹⁶ UNECE: Akronym: United Nations Economic Commission for Europe.

analysiert. Die Pkw-Zertifizierung wird in drei unterschiedliche Testklassen eingeteilt. Diese werden anhand der Leistungsdichten $< 22 \text{ kW/t}$, 22 kW/t bis 34 kW/t und $> 34 \text{ kW/t}$ bestimmt. In dieser Arbeit wird ausschließlich die Letztgenannte betrachtet, da die meisten Pkws in Europa eine Leistungsdichte $> 34 \text{ kW/t}$ aufweisen. Die Abbildung 2-2 b) stellt das dazugehörige Geschwindigkeitsprofil mit den vier Teilzyklen „Low“, „Middle“, „High“ und „Extra High“ dar. Der erste Teilzyklus „Low“ spiegelt dabei eine Innerortsfahrt mit vielen Änderungen der Geschwindigkeit und einer erhöhten Standzeit wider. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt in diesem Abschnitt $56,5 \text{ km/h}$. Insgesamt wird in der Phase „Low“ eine $3,10 \text{ km}$ lange Fahrstrecke in 589 s absolviert, was einer Durchschnittsgeschwindigkeit von $18,9 \text{ km/h}$ entspricht. In dem Abschnitt „Middle“ werden in dem Vergleich zu dem Profil „Low“ etwas höhere Geschwindigkeiten bei vielen Beschleunigungs- und vielen Abbremsvorgängen gefahren. Eine Höchstgeschwindigkeit von $76,6 \text{ km/h}$ wird hierbei erreicht. In 433 s wird eine Wegstrecke von $4,75 \text{ km}$ zurückgelegt und eine mittlere Geschwindigkeit von $39,5 \text{ km/h}$ erzielt. In dem Teilzyklus „High“ sind weniger Beschleunigungen enthalten und eine maximale Geschwindigkeit von $97,4 \text{ km/h}$ wird gefahren. Durchschnittlich wird in 455 s eine Geschwindigkeit von $56,7 \text{ km/h}$ erzielt und eine Distanz von $7,16 \text{ km}$ absolviert. Der letzte Abschnitt „Extra High“ bildet eine Fahrt mit einer hohen durchschnittlichen Geschwindigkeit von $92,0 \text{ km/h}$ ab. Aus dieser resultierend, wird in einer Fahrzeit von 323 s eine Wegstrecke von $8,25 \text{ km}$ zurückgelegt. Als Höchstgeschwindigkeit werden in diesem Profil $131,3 \text{ km/h}$ gefahren. Der WLTC der dritten Klasse ist durch die vier beschriebenen Phasen aufgebaut und bildet insgesamt eine Fahrstrecke von $23,26 \text{ km}$ und eine Fahrdauer von $1\ 800 \text{ s}$ ab. [24], [26]

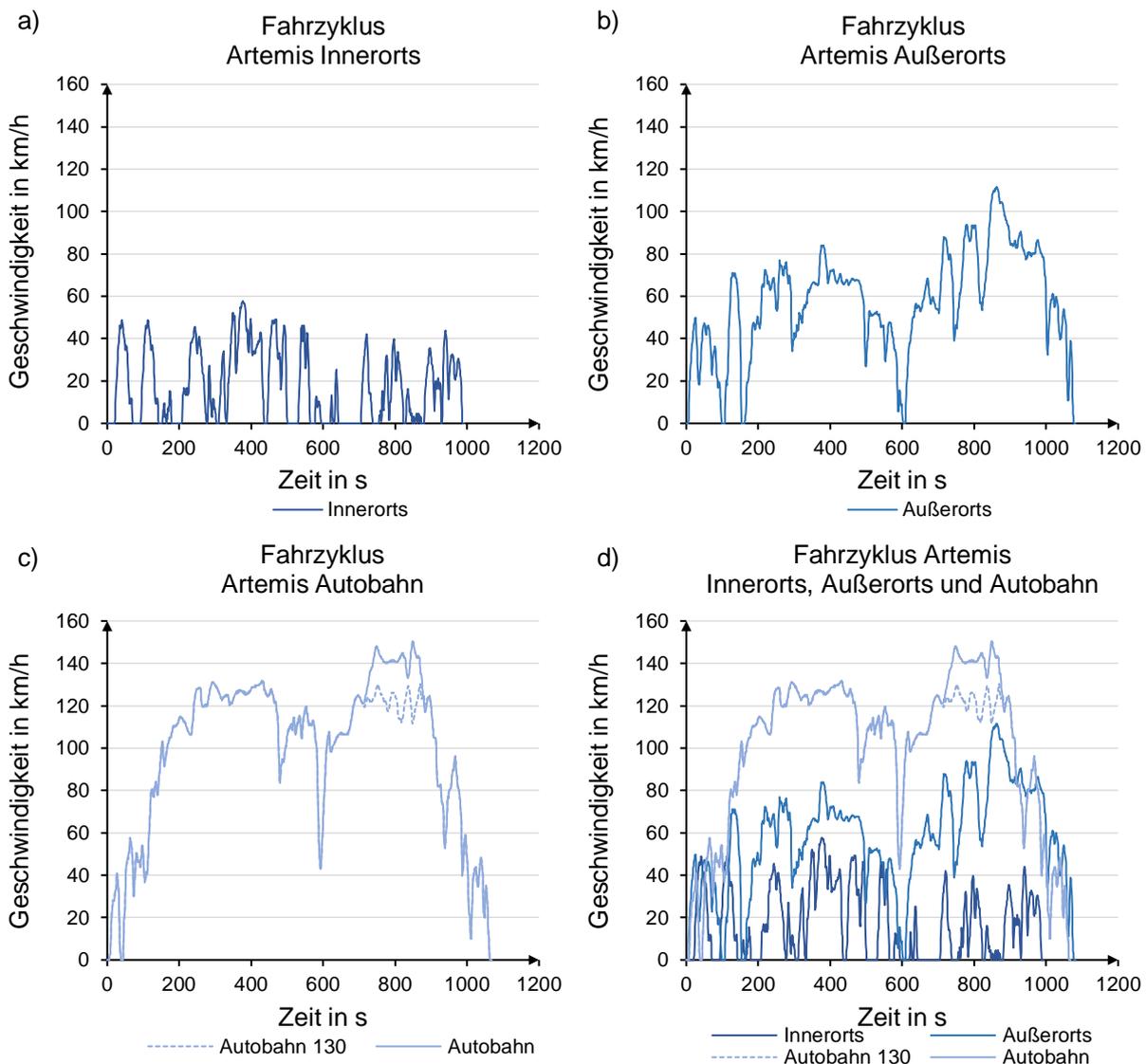


Abbildung 2-3 Artemisfahrzyklen a) Innerorts, b) Außerorts, c) Autobahn nach [28] und d) im Vergleich

Fahrzyklen Artemis Innerorts, Artemis Außerorts und Artemis Autobahn:

Neben den Zertifizierungszyklen werden in dieser Arbeit die Fahrprofile Artemis Innerorts, Artemis Außerorts und Artemis Autobahn verwendet. Diese Fahrprofile wurden in dem Rahmen des EU-Projekts ARTEMIS anhand von Messdaten konsolidiert. Bei der Erstellung der Zyklen wurden 77 Fahrzeuge, welche in Europa unter realen Fahrbedingungen fuhren, mit Messtechnik ausgestattet. Insgesamt wurden in 2 000 Tagen über 10 300 Fahrten, eine kumulierte Fahrleistung von 88 000 km und eine Fahrdauer von 2 200 Stunden berücksichtigt. [28], [29] Die Abbildung 2-3 stellt die ermittelten Fahrzyklen dar. Die Abbildung 2-3 a) zeigt dabei den Artemiszyklus Innerorts, b) den Artemiszyklus Außerorts, c) den Artemiszyklus Autobahn und d) einen Vergleich dieser. Der Innerortszyklus ist geprägt von vielen Beschleunigungsvorgängen, einigen Stopp-Phasen und einer maximalen Geschwindigkeit von knapp 58 km/h. Mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 17,6 km/h werden in 993 s 4,9 km zurückgelegt. In dem Außerortszyklus finden ebenfalls ausgeprägte Geschwindigkeitsänderungen statt. Stillstandzeiten sind selten und die Höchstgeschwindigkeit beläuft sich auf 99,5 km/h. In dem Außerortsprofil werden in 1 082 s mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 57,4 km/h 17,3 km gefahren. In dem Autobahnzyklus findet zunächst eine Anfahrt auf die Autobahn, gefolgt von einem Beschleunigungsvorgang auf diese, statt. Anschließend gibt es nur vereinzelt Verzögerungen. Als Höchstgeschwindigkeit wird eine Geschwindigkeit von 150,4 km/h in dem normalen und 130 km/h in dem, für kleinere Fahrzeuge, limitierten Autobahnzyklus erreicht. In dem normalen Autobahnprofil wird eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 99,5 km/h erreicht und in 1 068 s eine Distanz von 29,6 km zurückgelegt. [29], [30]

Vergleich der Fahrzyklen:

In der Tabelle 2-1 werden für einen Vergleich der Fahrzyklen die beschriebenen Ausprägungen Fahrprofil, Streckenprofile, Zykluslänge, Zyklusdauer, Durchschnittsgeschwindigkeit, Höchstgeschwindigkeit, maximale Beschleunigung und der Anteil der Standzeit verglichen. Anhand der aufgelisteten Kriterien werden relevante Unterschiede, wie beispielsweise eine maximale Geschwindigkeit von 57,7 km/h in dem Artemisprofil Innerorts und 150,4 km/h in dem Artemiszyklus Autobahn herausgearbeitet.

Tabelle 2-1 Vergleich der betrachteten Fahrzyklen anhand einer Auswahl relevanter Eigenschaften

Fahrzyklus	NEFZ	WLTC	Artemis Innerorts	Artemis Außerorts	Artemis Autobahn	Einheit
Fahrprofil	synthetisch	real	real	real	real	-
Streckenprofile	2	4	1	1	1	-
Zykluslänge	11,0	23,3	4,9	17,3	29,6	km
Zyklusdauer	1 180	1 800	993	1 082	1 068	s
Durch. Geschwindigkeit	33,3	46,4	17,6	57,4	99,5	km/h
Höchstgeschwindigkeit	120,0	131,3	57,7	111,5	150,4	km/h
Max. Beschleunigung	1,0	1,6	2,9	2,4	1,9	m/s ²
Anteil Standzeit	24,9 %	13,1 %	28,5 %	3,1 %	1,6 %	-

real: Basierend auf gemessenen Fahrzeugdaten.

Als Erstes werden die beiden Zertifizierungszyklen gegenübergestellt. Während das Fahrprofil des NEFZs synthetisch erstellt wurde, basiert jenes des WLTCs auf gemessenen Fahrdaten. Letzteres spiegelt deshalb ein reales Fahrverhalten besser wider. Insgesamt ist die Fahrdistanz in dem Fahrprofil des WLTCs mehr als doppelt so lang, die Fahrzeit um 620 s länger, die Durchschnitts- und die Höchstgeschwindigkeit sowie die maximale Beschleunigung höher und der Anteil der Standzeit niedriger. Durch eine längere Fahrstrecke und eine höhere Fahrleistung des WLTCs verringert sich einerseits der Einfluss des Motorwarmlaufs auf den gemittelten Verbrauch, andererseits erhöht sich der Energiebedarf durch die höheren Fahrwiderstände. Aufgrund einer geringeren, prozentualen Standzeit sinkt zudem der Effekt einer Start-Stopp-Automatik. Ferner ist die Homologation der Zyklen deutlich unterschiedlich. Hier sind vor allem die geänderte Messung der Fahrwiderstände und die Wahl der Übersetzungsstufen bei manuellen Getrieben zu nennen.

Als weiterführende Literatur zu dem Testverfahren des WLTCs, die WLTP¹⁷, ist die Website „World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29)“ der UNECE zu empfehlen [31].

Als Zweites werden die Zertifizierungszyklen mit den Artemisfahrprofilen verglichen. Hierbei fällt auf, dass die Artemiszyklen jeweils ein Streckenprofil separat abbilden, während bei den Zertifizierungsfahrprofilen ein Mix dieser repräsentiert wird. Das jeweilige Geschwindigkeitsprofil der Artemiszyklen ist dabei deutlich länger als jenes der Zertifizierungszyklen. In dem Artemiszyklus Innerorts werden beispielsweise 993 s in dem Innerortsprofil gefahren, während in der „Low“-Phase des WLTCs lediglich 589 s in diesem Profil gefahren werden. Zudem ist zu erkennen, dass in dem Vergleich zu den Zertifizierungszyklen höhere Durchschnitts- und höhere Höchstgeschwindigkeit sowie höhere maximale Beschleunigung abgebildet werden. Der Anteil der Standzeit ist in dem Artemis Innerorts gegenüber den Zertifizierungszyklen höher, während jener für den Artemis Außerorts und jener für den Artemis Autobahn niedriger ist. Aus dem längeren Abbildungszeitraum der einzelnen Fahrscenarien resultiert, dass die dedizierten Fahrteigenschaften der jeweiligen Streckenprofile verbessert wiedergegeben werden. Diese Ausprägung wird in dieser Arbeit methodenbedingt besonders benötigt, da darauf basierend die Häufigkeit der zyklusbedingten Anfahrvorgänge bei einem Repräsentieren einer Fahrsituation stark reduziert ist, vgl. dazu Kapitel 3.1.1.

2.3 Fahrwiderstände

Bei einem Beschleunigen, bei einem Verzögern, bei einem Ausrollen oder bei einem Fahren einer konstanten Geschwindigkeit werden Fahrwiderstände überwunden, um die beschriebenen Fahrprofile abzufahren. Die Abbildung 2-4 stellt die dabei zu überwindenden Fahrwiderstände grafisch dar.

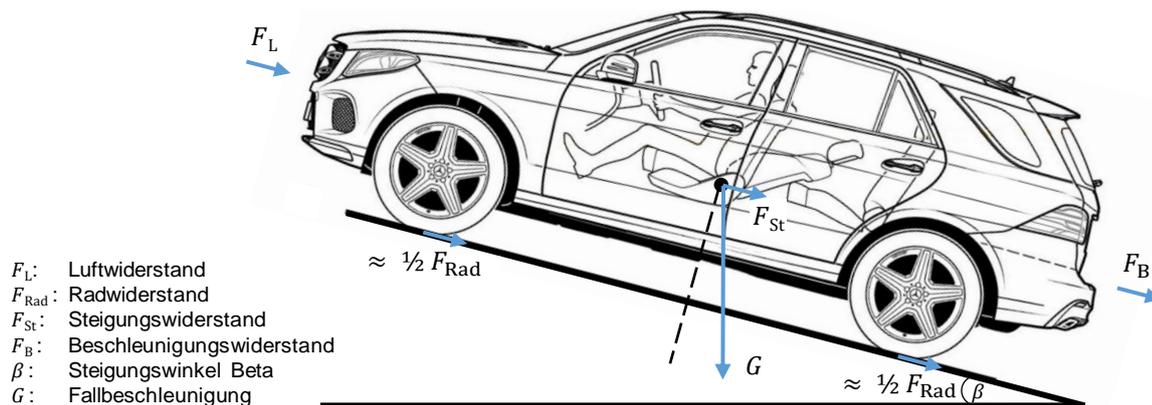


Abbildung 2-4 Übersicht über die Fahrwiderstände nach [4], Bild von [32]

Die Summe der **Fahrwiderstandskräfte** F_{FW} wird über die Bilanzierung der Rad-, der Luft-, der Steigungs- und der Beschleunigungswiderstandskraft

$$F_{FW} = F_{Rad} + F_L + F_{St} + F_B \quad (2-1)$$

ermittelt, wobei F_{Rad} die Rad-, F_L die Luft-, F_{St} die Steigungs- und F_B die Beschleunigungswiderstandskraft ist.

Die **Radwiderstandskraft** setzt sich in dem Wesentlichen aus den Widerständen (Walk-, Reib- und Lüfterwiderstand) und der Lagerreibung zusammen [13]. Der Rollwiderstand, welcher primär durch Walkverluste bestimmt ist, weist dabei den dominierenden Anteil auf. Vereinfacht kann der Radwiderstand dem Rollwiderstand gleichgesetzt werden [33]. Wie in der Gleichung

$$F_{Rad} \approx F_{Roll} = \mu_R \cdot F_N \cdot \cos \beta \quad (2-2)$$

¹⁷ WLTP: Akronym für Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure.

enthalten, setzt sich der Rollwiderstand $F_{R_{\text{oll}}}$ aus dem Rollwiderstandsbeiwert μ_R , der Normalkraft F_N und dem Cosinus des Steigungswinkels β zusammen. F_R ist dabei von verschiedenen Faktoren abhängig, welche einen Einfluss auf die Verformung des Reifens besitzen. Unter anderem ist F_R von der Reifenbauart und den Reifendimensionen, dem Reifendruck, der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie dem Schräglaufwinkel und dem Sturz abhängig [34]. Der Rollwiderstandsbeiwert gängiger Fahrzeugreifen liegt bei niedrigen Geschwindigkeiten bei etwa 8 ‰ und bei hohen Geschwindigkeiten bei ca. 13 ‰ [35], wohingegen hochmoderne Spezialreifen für Verbrauchswettbewerbe 1 ‰ aufweisen [36].

Während der Rollwiderstand an den Rädern angreift, wirkt der **Luftwiderstand** bei der Um- und bei der Durchströmung des Fahrzeugs. Dieser Fahrwiderstand ist somit hauptsächlich durch den Druck-, den Oberflächen- und den Durchströmungswiderstand geprägt und wird durch die Formel

$$F_L = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot (v - v_w)^2 \quad (2-3)$$

bestimmt [13]. Der Luftwiderstand ist abhängig von dem dimensionslosen Luftwiderstandsbeiwert c_w , der Anströmfläche A , der Luftdichte ρ_L , der Fahrzeuggeschwindigkeit v und der in Fahrtrichtung orientierten Windgeschwindigkeit v_w . Die Summe aus der Fahrzeug- und der Windgeschwindigkeit bildet die Anströmgeschwindigkeit. Diese geht in die Berechnung des Luftwiderstands quadratisch ein, weshalb der Luftwiderstand bei hohen Fahrgeschwindigkeiten dominant ist. Der Luftwiderstand ist fahrzeugspezifisch und hängt von der Aerodynamik des Fahrzeugs ab. Bei gängigen Pkws liegt der Luftwiderstandsbeiwert in dem Bereich von ca. 0,23 bis etwa 0,40 und die Anströmfläche nimmt Werte von ca. 1,5 m² bis etwa 2,5 m² ein.

Bewegt sich ein Fahrzeug nicht auf einer horizontalen Ebene, muss zusätzlich die **Steigungswiderstandskraft** F_{St} berücksichtigt werden. Über den Zusammenhang

$$F_{St} = F_N \cdot \sin \beta \quad (2-4)$$

wird diese bestimmt und entspricht dem parallel zur Fahrbahn wirkenden Anteil der Normalkraft, welche sich aus der Fahrzeugmasse m , der Erdbeschleunigung g und dem Sinus des Steigungswinkels β zusammensetzt.

Soll ein Fahrzeug zudem aktiv beschleunigt oder aktiv abgebremst werden, muss eine **Beschleunigungskraft** F_B zu der Verfügung gestellt werden. Der dabei zu überwindende Beschleunigungswiderstand wird durch die Trägheit der Massen erzeugt, welche sowohl eine translatorische als auch eine rotatorische Beschleunigung erfahren können. Werden kleinere Trägheitsmomente an Wellen und in dem Getriebe vernachlässigt und eine konstante Rotationsenergie, gebildet aus dem Trägheitsmoment J multipliziert mit dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit ω , $J \cdot \omega^2 = const$, angenommen, kann die Beschleunigungskraft mit

$$F_B = m_{\text{red}} \cdot \frac{dv}{dt} = \left(m + \frac{J_{R+i^2} \cdot J_M}{r_{\text{stat}} \cdot r_{\text{dyn}}} \right) \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2-5)$$

berechnet werden. Hierbei werden die Fahrzeugmasse m , das Massenträgheitsmoment der Räder J_R und jenes des Motors J_M , die Gesamtübersetzung i , der statische und der dynamische Reifenhalfmesser, r_{stat} und r_{dyn} , und die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit $\frac{dv}{dt}$ berücksichtigt.

Wird die Summe der Fahrwiderstandskräfte F_{FW} mit der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit v multipliziert, ergibt sich die aktuelle **Fahrwiderstandsleistung** P_{FW} . Diese wird über

$$P_{FW} = F_{FW} \cdot v \quad (2-6)$$

ermittelt. Die Abbildung 2-5 stellt die Fahrwiderstandsleistung und deren Zusammensetzung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit dar. In dem Diagramm sind die einzelnen, aus den Widerstandsarten resultierenden, Verläufe der Leistungen und die Summe derer für ein Beispielfahrzeug mit den Fahrzeugeigenschaften $m = 1\,700\text{ kg}$, $c_w = 0,32$, $A = 2,32\text{ m}^2$ und $\mu_{R,v=0} = 9\text{ ‰}$ abgebildet. Handelt es sich in der Abbildung um eine Gerade mit einer konstanten Steigung, ist die entsprechende Fahrwiderstandskraft nicht von der Geschwindigkeit abhängig. In dem dargestellten Beispiel ist dies sowohl die Beschleunigungs- als auch die Hangabtriebskraft.

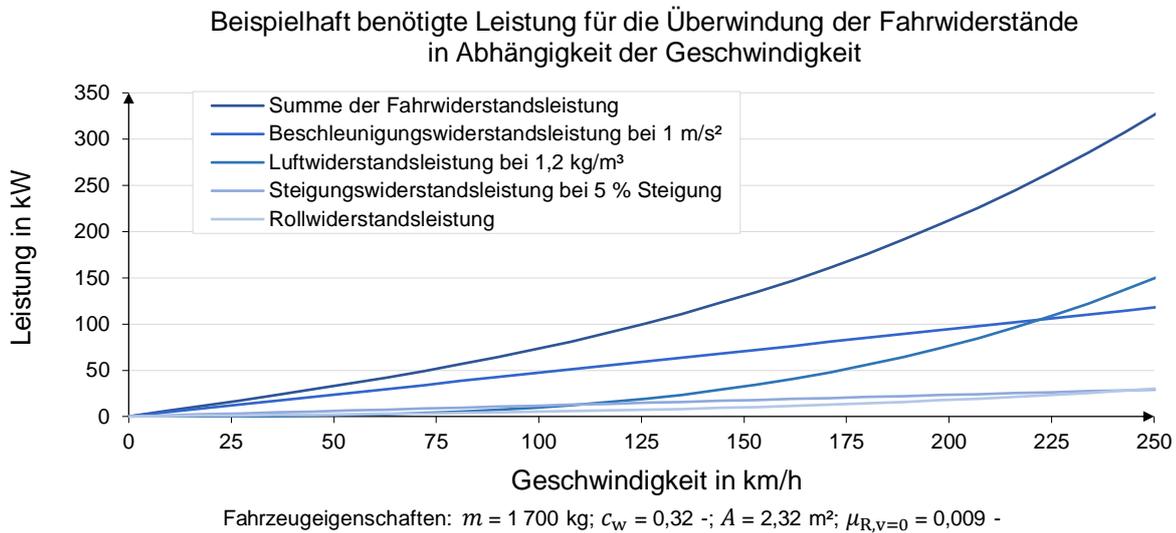


Abbildung 2-5 Beispielhaft benötigte Leistung für die Überwindung der Fahrwiderstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Soll ein Fahrzeug aktiv bewegt werden, müssen die beschriebenen, situationsabhängigen Fahrwiderstände überwunden und eine mechanische Leistung an den Reifen anliegen. Die Bereitstellung der benötigten Leistung kann durch unterschiedliche Energiewandler erfolgen. In dem folgenden Unterpunkt wird deshalb auf verschiedene Fahrzeugarchitekturen eingegangen und deren Aufbau kurz beschrieben.

2.4 Grundlegender Aufbau der analysierten Fahrzeugarchitekturen

Die Abbildung 2-6 zeigt ein Überblick über die, in dieser Arbeit, analysierten Fahrzeugarchitekturen, beinhaltet zusätzlich einen Plug-In-Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor und dient dem Zweck die unterschiedlichen Antriebsmöglichkeiten zu verstehen. Die Visualisierung beinhaltet die Antriebsvarianten des reinen batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV), des hauptsächlich mit einem Brennstoffzellensystem betriebenen Fahrzeugs (FCEV), des Brennstoffzellenfahrzeugs mit einem Plug-In-Batteriesystem (FC-PHEV), des überwiegend batteriebetriebenen Fahrzeugs mit einem Brennstoffzellen-Range-Extender (FC-REEV), des Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor und mit einem Plug-In-Batteriesystem (ICE-PHEV¹⁸) und des alleinig mit einem Otto- oder mit einem Dieselmotor betriebenen Fahrzeugs (ICE-G- und ICE-D-Fahrzeug). In dem Folgendem werden die dargestellten Antriebsvarianten grundlegend und in dem Kapitel 5 in dem Detail beschrieben.

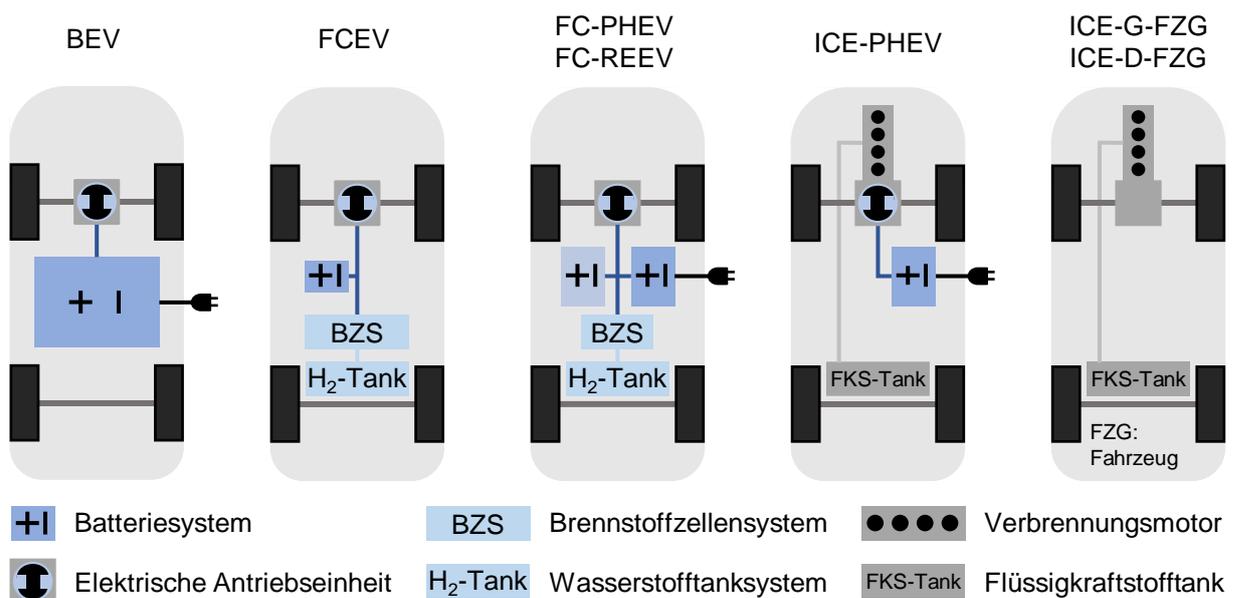


Abbildung 2-6 Übersicht über verschiedene Fahrzeugarchitekturen, nach [37]

Das Batteriefahrzeug – BEV:

Ein BEV ist mit einer elektrischen Antriebseinheit und einem Batteriesystem, welches extern aufgeladen wird, aufgebaut. Über eine, in den Batteriezellen, elektrochemisch gebundene Energie wird eine elektrische Maschine gespeist. Wird ein Elektromotor als Generator betrieben, kann bei einem Abbremsen eines Fahrzeugs Energie zurückgewonnen und in ein Batteriesystem eingespeist werden. Der dabei durchgeführte Vorgang wird „Rekuperation“ genannt. Als Batterietechnologie wird hauptsächlich die Lithium-Ionen-Technologie verwendet. Der smart electric drive der Firma Daimler AG ist beispielsweise ein BEV. Dieser erzielt eine Reichweite von 145 km [38].

Das Brennstoffzellenfahrzeug – FCEV:

Ein FCEV besitzt ebenfalls eine elektrische Antriebseinheit. Zudem ist ein Brennstoffzellensystem (BZS) mit einem Wasserstofftanksystem verbaut. Des Weiteren ist es möglich, dass ein Hybrid-Batteriesystem¹⁹ implementiert ist. Durch eine Brennstoffzelle wird eine, in dem Wasserstoff gebundene, chemische Energie umgewandelt und in elektrischer Form einem Elektromotor zugeführt. Dieser treibt, analog einem BEV, über ein, meist einstufiges, Getriebe und ein Differentialgetriebe eine Antriebsachse an. Über das eingebaute Batteriesystem kann rekuperiert, das BZS durch eine Lastpunktverschiebung länger in dem Bereich des Maximums der Effizienz gehalten und bei einem Bedarf einer Spitzenleistung

¹⁸ ICE-PHEV: engl. internal combustion engine plug-in electric vehicle; z. Dt. Plug-In-Fahrzeug mit Verbrennungsmotor.

¹⁹ Ein Hybrid-Batteriesystem ist ein für den Einsatz im Hybridfahrzeug geeignetes Batteriesystem.

temporär eine kombinierte Maximalleistung bereitgestellt werden. Letzteres Vorgehen wird „Boosten“ genannt. Die Mercedes-Benz B-Klasse F-CELL der Firma Daimler AG, mit einer Reichweite von 400 km, ist ein Beispiel dieser Antriebsvariante [38].

Das Brennstoffzellenfahrzeug mit Plug-In Batteriesystem – FC-PHEV:

Ein FC-PHEV stellt eine Erweiterung eines FCEVs dar. Dieses besitzt anstatt eines Hybrid- ein Plug-In-Batteriesystem²⁰. Mittels eines größer dimensionierten Batteriesystems kann diese Fahrzeugvariante auch längere Fahrtstrecken, neben einem Brennstoffzellenbetrieb, rein batterieelektrisch fahren. Wenn die Leistungsanforderung während einer batterieelektrischen Fahrt die maximale Leistung des Batteriesystems übersteigt, wirkt das BZS mit. Dies gilt auch umgekehrt, wobei das Batteriesystem, wie auch bei einem reinen FCEV, der Rekuperation, der Lastpunktverschiebung und dem Boosten dient. Durch die Dimensionierung des BZSs bzw. des Batteriesystems wird die brennstoffzellen- bzw. die batteriebetriebene, permanente Höchstgeschwindigkeit festgelegt. Das erste seriennahe Fahrzeug mit dieser Antriebstechnologie ist der Mercedes-Benz GLC F-CELL der Firma Daimler AG. Während in dem reinen Batteriemodus die Reichweite ca. 50 km beträgt, können mit der, in dem mitgeführten Wasserstoff gespeicherten, Energie ca. 430 km zurückgelegt werden [39].

Das batteriebetriebene Fahrzeug mit Brennstoffzellen-Range-Extender – FC-REEV:

Ein FC-REEV ist ein, mit einem Brennstoffzellen-Range-Extender ausgestattetes, batterieelektrisches Fahrzeug. Der Brennstoffzellen-Range-Extender besteht aus einem Brennstoffzellen- und einem Wasserstofftanksystem. Durch den eingebauten Range-Extender wird die Reichweite des Fahrzeugs erhöht. Das BZS und das Wasserstofftanksystem, sind dabei kleiner als bei einem FCEV oder bei einem FC-PHEV dimensioniert. Die Leistung des Range-Extenders dient der Bereitstellung einer Mindestleistung bzw. dem Laden des Akkumulators. Der umgebaute Renault HYKangoo Maxi Z.E. der Firma Symbio FCell entspricht einem FC-REEV. Mit einer Erweiterung der reinen batterieelektrischen Fahrzeugvariante wird die Reichweite bei diesem Derivat von ca. 161 km auf ca. 482 km erhöht [40].

Das verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeug mit Plug-In-Batteriesystem – ICE-PHEV:

Ein ICE-PHEV ist ähnlich einem FC-PHEV aufgebaut. Anstatt der brennstoffzellenspezifischen Komponenten besitzt diese Plug-In-Antriebsvariante einen Verbrennungsmotor und ein entsprechendes konventionelles Tanksystem. Über den Verbrennungsmotor oder über das Plug-In-Batteriesystem in dem Zusammenspiel mit dem Elektromotor wird das Fahrzeug angetrieben. Bei einem kombinierten Betrieb kann durch die elektrische Antriebseinheit eine Lastpunktverschiebung, Lasterhöhung oder -absenkung und das bereits beschriebene Boosten, stattfinden. Während durch eine zusätzliche Leistungsbereitstellung erhöhte Beschleunigungswerte erreicht werden, steht mit einer Lastpunktverschiebung eine Verbrauchsminderung in dem Fokus. Ein Beispiel für eine ICE-Plug-In-Fahrzeug ist die Mercedes-Benz S-Klasse 560e der Firma Daimler AG. Rein batterieelektrisch kann mit diesem Fahrzeug eine Fahrtstrecke von ca. 50 km gefahren werden [38].

Das mit einem Otto- oder mit einem Dieselmotor betriebene Fahrzeug – ICE-G- oder ICE-D-Fahrzeug:

Ein ICE-G- bzw. ein ICE-D-Fahrzeug entspricht einem konventionellen Fahrzeug mit einem Otto- bzw. mit einem Dieselmotor. Der Verbrennungsmotor stellt die mechanische Leistung für die Bewegung zu der Verfügung. Mittels des konventionellen Tanksystems und einer hohen spezifischen Energiedichte des Benzin- bzw. des Dieselkraftstoffs werden hohe Reichweiten und kurze Tankzeiten erzielt. Die Mercedes-Benz C-Klasse C 200 der Firma Daimler AG entspricht einem Fahrzeug mit einem Ottomotor und erreicht mit einer Tankfüllung von 41 l Benzin-Kraftstoff eine Reichweite von mehr als 600 km [41].

²⁰ Ein Plug-In-Batteriesystem ist ein für ein Plug-In-Fahrzeuge geeignetes Batteriesystem.

Für jede Antriebsvariante ist am Ende des jeweiligen Abschnitts ein Fahrzeugbeispiel genannt. Die Abbildung 2-7 visualisiert diese und stellt diese gegenüber.



Abbildung 2-7 Fahrzeugbeispiele mit unterschiedlichen Antriebsarten, Bilder nach [42]–[46]

Die gezeigten Varianten der Antriebe sind mit diversen, für die Leistungsbereitstellung zuständigen, Komponenten ausgestattet. Auf die wichtigsten Bauteile der unterschiedlichen Aufbauten der Antriebsstränge wird in dem folgenden Abschnitt detailliert eingegangen.

2.5 Fahrzeugkomponenten

Mit der gezeigten Auswahl an Antriebsvarianten ergibt sich eine Vielzahl eingesetzter Komponenten bzw. eingesetzter Systeme. Die Relevantesten dieser werden folgend erklärt. Aufgebaut ist der Unterpunkt 2.5 in der Reihenfolge 2.5.1 Batteriezelle und Batteriesystem, 2.5.2 Brennstoffzelle und Brennstoffzellensystem, 2.5.3 Leistungselektronik, 2.5.4 Elektromotor, 2.5.5 Verbrennungsmotor und 2.5.6 Getriebe und Differenzialgetriebe. Mit der gewählten Reihenfolge wird initial auf Energiespeicher, gefolgt auf Energiewandler und abschließend auf die mechanische Energieübertragung eingegangen. Zunächst werden die Batteriezelle und das Batteriesystem erklärt. Dabei wird als Erstes die Funktionsweise, als Zweites der Weg von der Batteriezelle zu einem System und zu dem Ende dieses Unterpunkts mögliche Thermomanagementlösungen vorgestellt. Das Vorgehen der Beschreibung wird für die nachfolgenden Unterpunkte beibehalten.

2.5.1 Batteriezelle und Batteriesystem

Ein Batteriesystem wird in vielen Fahrzeugkonfigurationen eingesetzt. Dabei dient dieses als Energiespeicher und als Leistungsversorger der elektrischen Verbraucher. Je nach Antriebsart und je nach Einsatzzweck variieren die Anforderungen an das Batteriesystem. In dem Bereich alternativer Antriebe liegt der Fokus auf der Energie- und der Leistungsdichte bei einer gleichzeitigen Einhaltung von Kosten-, von Sicherheits- und von Lebensdauerprämissen [47], [48]. Während bei konventionellen Fahrzeugen noch eine 12-V-Batterie auf Blei-Technologie eingesetzt wird, dominiert bei höher elektrifizierten Antrieben derzeit die Lithium-Ionen-Zellchemie. Folgend wird deshalb ausschließlich auf letztgenannte Technologie eingegangen.

Der Aufbau und die Funktionsweise unterschiedlicher Batterie-Technologien sind prinzipiell ähnlich. Wie die Abbildung 2-8 zeigt, besteht eine Batteriezelle generell aus zwei unterschiedlichen Aktivmassen – Elektroden, einem Elektrolyt und einem Separator. Basierend auf den unterschiedlichen Materialien der beiden Elektroden mit unterschiedlichen Potenzialen bildet sich eine Potenzialdifferenz, welche Zellspannung genannt wird, aus. Über einen ionenleitenden Elektrolyt sind die Aktivmaterialien indirekt verbunden. Ohne eine weitere Verbindung der Elektroden findet kein oder nur ein geringfügiger Ladungsaustausch statt, da der Elektrolyt und der Separator diesen unterbinden. Wenn die Elektroden elektrisch verbunden werden, läuft eine elektrochemische Reaktion ab. Getrieben von der Potenzialdifferenz diffundieren die Ionen durch den Elektrolyt. Durch Elektronenbewegungen über einen Stromableiter gleicht sich die Potenzialdifferenz aus. Wird ein elektrischer Verbraucher zwischen den beiden Aktivmaterialien geschaltet, wird dieser mit dem entstehenden Stromfluss versorgt. Der Strom fließt dabei solange bis die Potenzialdifferenz ausgeglichen ist. Der Ablauf der elektrochemischen Reaktion kann durch das Anlegen einer äußeren Spannung umgekehrt und der Akkumulator wieder aufgeladen werden. [47]

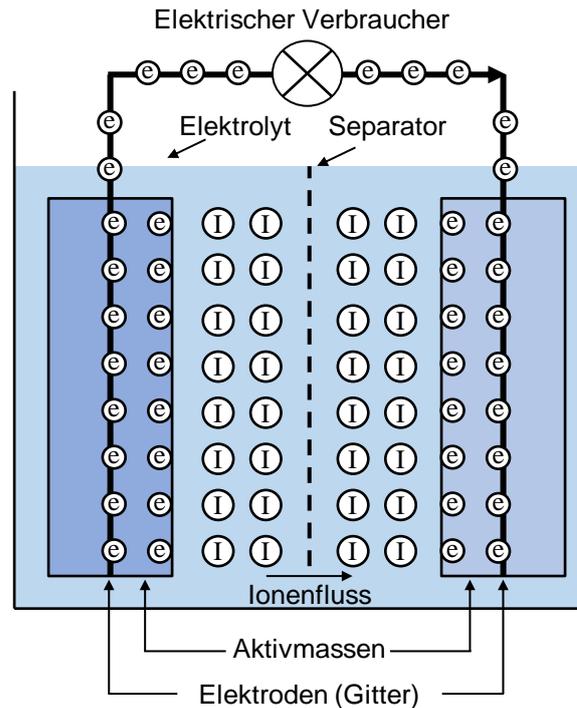


Abbildung 2-8 Prinzipieller Aufbau eines elektrochemischen Energiespeichers, nach [47]

Basierend auf den verschiedenen Materialkombinationen liegt die Potenzialdifferenz von einzelnen Lithium-Ionen-Zellen in dem Bereich von ca. 1,5 V bis ca. 4,2 V [49], [50]. Sowohl dieses Spannungsniveau als auch die dazugehörige Kapazität einer einzelnen Zelle sind für die meisten Anwendungen in dem Automobilbereich nicht ausreichend. Wie in der Abbildung 2-9 veranschaulicht, werden Batteriezellen deshalb zu Batteriemodulen und diese zu einem Batteriesystem verschaltet. Die einzelne Batteriezelle wird dabei als zylindrische, als prismatische oder als sog. Pouch-Bag-Zelle²¹ gestaltet. Batteriezellen werden in Reihe verschaltet, um die Spannung des Systems zu erhöhen. Ist eine gewünschte Spannung erreicht, wird über eine Parallelschaltung die Kapazität erhöht.

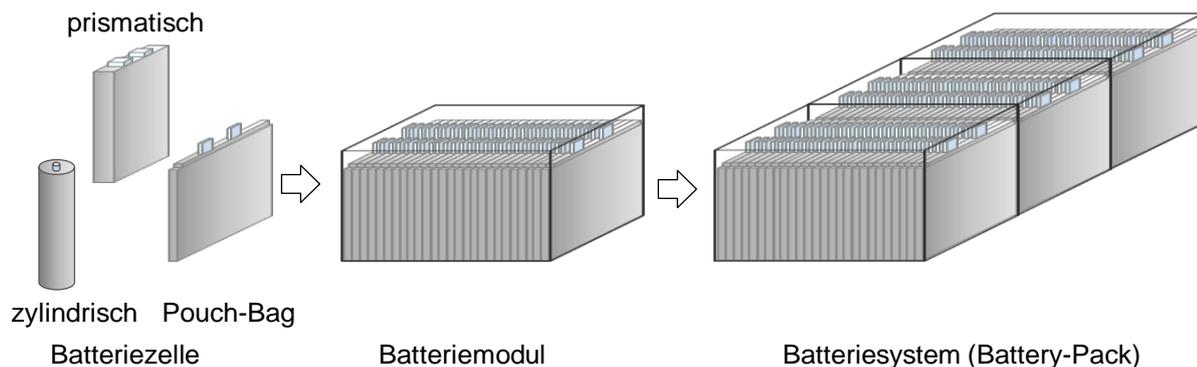


Abbildung 2-9 Aufbau eines Batteriesystems (Batteriezelle, -modul und -system), nach [51], [52]

Ist eine, zu einer Anforderung passende, Kombination durch eine Reihen- und eine Parallelschaltung fixiert, wird ein Batteriesystem aufgebaut. Die Abbildung 2-10 zeigt die dafür notwendigen Bestandteile a) schematisch und b) anhand eines realen Aufbaus. Das Batteriesystem besteht neben den verschalteten Einzelzellen aus einem Batteriemanagementsystem (BMS), einem Gehäuse, einer Heizung, einem Hochvoltanschluss (inkl. Schütz) und einer Kühlung. Das BMS regelt das Thermo- und das Energiemanagement und überwacht auf System- und auf Zellebene. Unterschiedliche Ladezustände werden detektiert und ausgeglichen. Zudem stellt das BMS die Kommunikation auf Systemebene sicher und

²¹ Pouch-Bag-Zelle: Fachbegriff einer Zellenform eines Lithium-Ionen-Akkumulators (vgl. Abbildung 2-9 links).

verarbeitet Statusinformationen, wie beispielsweise die Systemspannung, den Systemstrom, die Systemtemperatur und die Temperaturen der Zellen. Mittels der aufgezeichneten Informationen wird das Thermo- und das Energiemanagement geregelt und ein sicherer Betrieb gewährleistet. Wenn der Hochvoltanschluss dennoch getrennt werden muss, wird dieser durch die Betätigung eines Schützes unterbrochen. In sicherheitskritischen Zuständen, wie beispielsweise bei einem Unfall oder während eines Service, ist dies der Fall. Mit dem Ziel sowohl die Batteriezellen von äußeren Einflüssen als auch die Insassen in einem Crashfall zu schützen, sind die Batteriezellen in einem Gehäuse untergebracht. Sollte das BMS eine Abweichung des thermischen Sollzustands erfassen, wird die Kühlung bzw. die Heizung geregelt. Dies ist erforderlich, da unter anderem die Leistung, die Verfügbarkeit und die Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Zelle stark temperaturabhängig sind, vgl. dazu Tabelle 2-2 auf der Seite 22. [48]

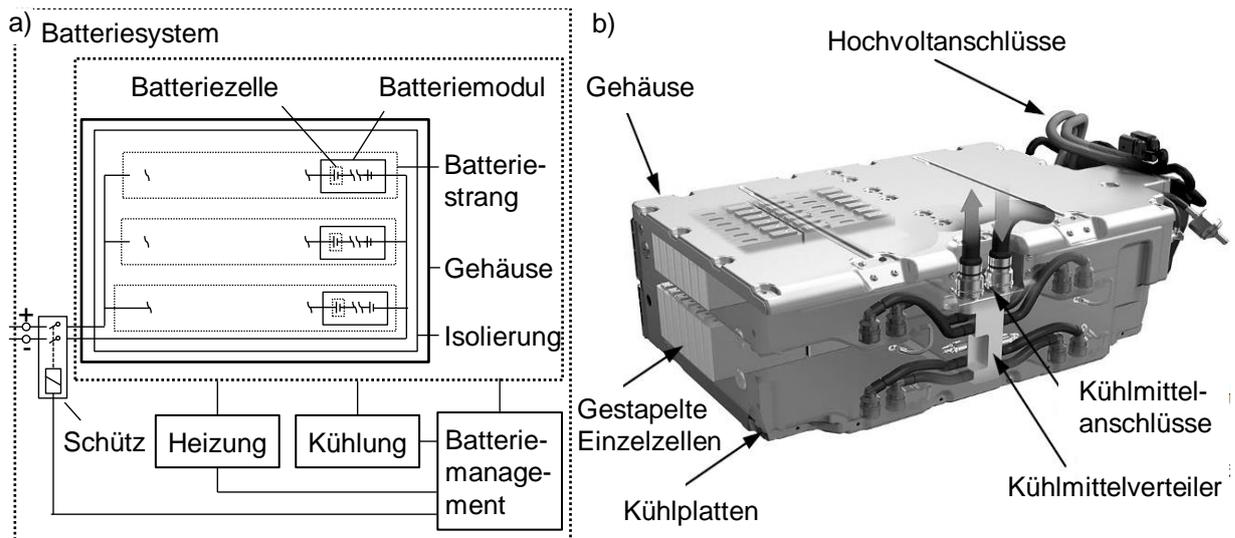


Abbildung 2-10 Aufbau eines Batteriesystems a) schematisch nach [48] und b) praktisch nach [11]

Die Soll-Betriebstemperatur eines Batteriesystems, bei jener die Leistungsfähigkeit und die Verfügbarkeit maximal sind und zugleich die Alterung minimal ist, liegt zwischen 20 °C und 40 °C. Wenn die Zelltemperatur geringer ist, steigen der Innenwiderstand und die Zellerterung bei dem Laden. Besonders unterhalb von -20 °C steigen die Innenwiderstände überproportional an. Zwischen -20 °C und 0 °C ist das Leistungsvermögen um bis zu 30 % reduziert und spezielle Alterungsmechanismen, welche zu einer irreversiblen Schädigung der Zelle führen können, treten auf. Vor allem das bei dem Laden auftretende Lithium-Plating ist hier zu erwähnen. Bei diesem Phänomen werden die einzelnen Li-Ionen nicht ausreichend schnell eingelagert. Ein Agglomerat von Lithium-Ionen entsteht und reines, metallisches Lithium bildet sich. Das dadurch teilweise irreversibel gebundene Lithium steht anschließend nicht mehr für einen Ladungstransport zu der Verfügung und die Kapazität der Zelle sinkt. In dem schlimmsten Fall baut sich das metallische Lithium so lange auf, bis der Separator durchstoßen und die Zelle kurzgeschlossen wird. Die Einlagerungsgeschwindigkeit muss entweder erhöht oder die Anzahl der Li-Ionen während des Ladens reduziert werden, um dies zu verhindern. Die Zelle muss somit erwärmt oder der Ladestrom reduziert werden. Durch eine Reduzierung des Ladestroms wird die Möglichkeit einer Reku-peration eingeschränkt. Aus Effizienzgründen wird deshalb versucht die Batterietemperatur möglichst zeit-nah zu erwärmen. Dazu werden die folgend beschriebenen Batterieheizmethoden verwendet. Übersteigt die Temperatur der Zelle 40 °C, altert diese überproportional schnell. Hierfür verantwortlich sind Alterungsmechanismen, die mit der Arrhenius-Gleichung²² erfasst werden. Bei noch höheren Tem-peraturbereichen wird die thermische Grenze des Elektrolyts erreicht und eine Entflammung (thermal runaway) droht. Die Kühlung muss deshalb auf einen maximal kritischen Fall ausgelegt werden, um dies auszuschließen. In dem nächsten Abschnitt werden mögliche Batteriesystemkühlungen erläutert.

²² Arrhenius-Gleichung: Empirische Gleichung benannt nach Svante Arrhenius welche näherungsweise eine Temperaturabhängigkeit chemischer und physikalischer Prozesse auf molekularer Ebene beschreibt.

Neben der optimalen Betriebstemperatur ist eine maximale Temperaturdifferenz der Zellen von 5 K einzuhalten, um eine homogene Alterung sicherzustellen und gleichzeitig den Balancing²³-Aufwand, das Gleichhalten des Ladezustands, zu minimieren. [53]

Tabelle 2-2 Einfluss der Temperatur auf eine Lithium-Ionen-Zelle nach [53]

Betriebstemperatur:	-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C
Leistung / Verfügbarkeit:	70 % sehr hoher R_{Zi}	90 % sehr hoher R_{Zi}	100 %	100 % → 0 % Abregelung	
Lebensdauer:	Zellalterung bei dem Laden		Ideale Temperatur	Zellalterung → thermal runaway	
Thermomanagement:	Heizen			Kühlen	
	$\Delta T_{Zellen} < 5 \text{ K}$				

R_{Zi} : Innenwiderstand der Zelle

ΔT_{Zellen} : Differenz der Temperatur der Zellen

Batteriesystemkühlung:

Ein Batteriesystem kann über diverse Ausführungen gekühlt werden. Die Abbildung 2-11 stellt eine Übersicht über die Varianten a) die Luftkühlung, b) die direkte Kältemittelkühlung und c) die Kältemittelkühlung inkl. Kältemittelkreislauf dar.

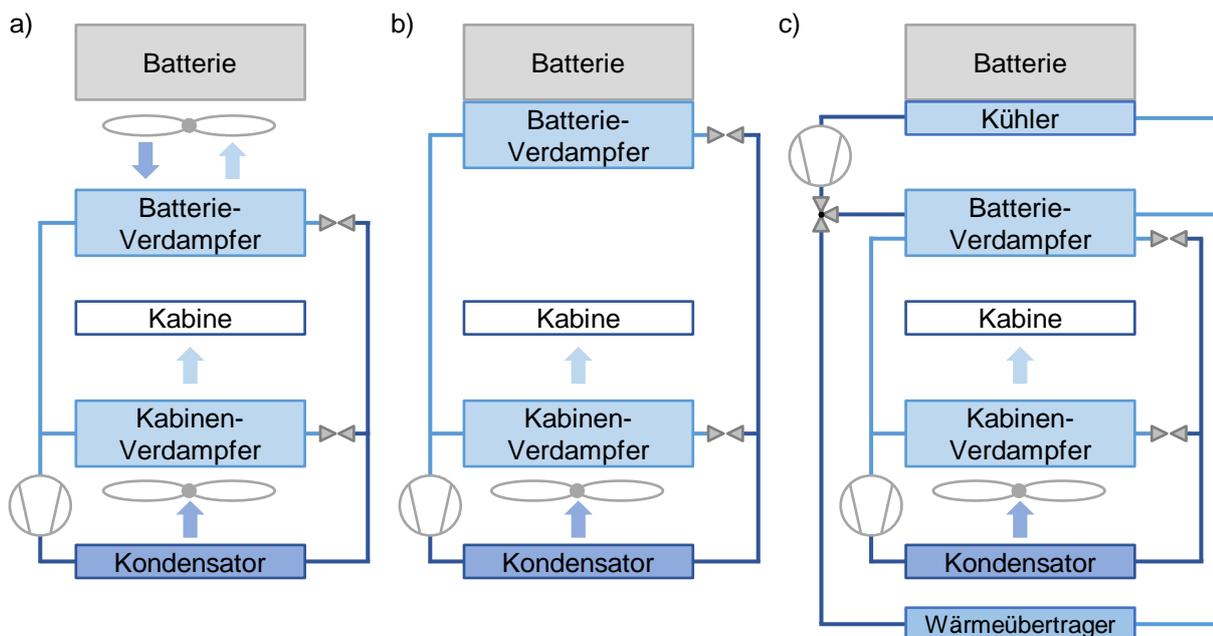


Abbildung 2-11 Übersicht über verschiedene Batteriekühlkonzepte: a) Luftkühlung, b) direkte Kältemittelkühlung und c) Kältemittelkühlung inkl. Kältemittelkreislauf nach [53]

Bei einer **reinen Luftkühlung** wird die Luft über große Kanäle zu dem Batteriesystem geleitet und durch einen Verdampfer abgekühlt. Das Kältemittel nimmt während der Verdampfung Wärme auf und kühlt die Luft ab. Die kalte Luft erwärmt sich entlang der Zellen und wird direkt danach der Umgebung zugeführt. Ein Vorteil eines luftgekühlten Batteriesystems ist ein äußerst einfacher Aufbau. Nachteilig sind große Luftkanäle, eine hohe Masse des Gebläses, störende Geräusche und eine notwendige Filterung der Luft. Wird das Batteriesystem mittels einer **direkten Kältemittelkühlung** gekühlt, stellt der Batterieverdampfer die thermische Verbindung dar. Durch ein Verdampfen des Kältemittels wird Wärme aufgenommen und die Batteriezellen werden direkt gekühlt. Bei dem Auslegen des Kühlkanäles muss auf den Verlauf der Kühlkanäle geachtet werden, um die geforderte, maximale Differenz der Temperaturen

²³ Balancing: englischer Begriff. Z. Dt. Abgleichen oder Ausbalancieren.

der Zellen einzuhalten. Da der Aufbau nur einen zusätzlichen Verdampfer, ein Expansionsventil und zwei Kältemittelleitungen benötigt, spiegelt diese Kühlungsvariante die kompakteste Bauform wider. Der dritte Kühlaufbau ist die **Kühlmittelkühlung inkl. Kältemittelkreislauf**. Bei dieser Methode steht die Batterie wärmeleitend mit einem Kühlmittelkühler in Kontakt. Eine Wasser-Glykol-Mischung durchströmt den Kühler mit Kühlmittel und sorgt für eine möglichst homogene Temperaturverteilung. Der Kühlmittelkreislauf besitzt einen, mit dem Luftkanal verbundenen, Wärmeübertrager. Über diesen wird Wärme an die Umgebung abgegeben. Ist die Temperaturdifferenz zu der Umgebung nicht ausreichend, wird über einen Batterieverdampfer, auch Chiller genannt, zusätzlich Wärme durch den Verdampfungsprozess des Kältemittels dem Kühlmittel entnommen und das Batteriesystem weiter gekühlt. [53]

Batterieheizung:

Aufgrund kalter Temperaturen und einer damit verbundenen Verschlechterung der Eigenschaften werden Batteriezellen aufgewärmt. Dies erfolgt analog zu der Kühlung mittels Luft, durch einen direkten Kontakt, oder indirekt über das Kühlmittel. Für das Heizen kann fossile oder elektrische Energie aufgewendet werden. In der Regel wird jedoch Strom als Energiequelle genutzt, da bei fossiler Energie unter anderem die marktseitige Akzeptanz gering ist. Folglich werden überwiegend elektrische Heizer oder Wärmepumpen für die Erwärmung eines Batteriesystems eingesetzt.

Bei einer **Temperierung mittels warmer Luft** wird entweder die aufgewärmte Kabinenluft direkt oder ein separater elektrischer Luft-Heizer für die Erwärmung dieser genutzt. Da der Wärmeaustausch nur umgekehrt zu der Luftkühlung erfolgt, weist diese Variante die gleichen Vor- und die gleichen Nachteile der Luftkühlung auf. Für eine **direkte Erwärmung der Batteriezellen** werden zwei unterschiedliche Varianten angewandt. Zu dem einen wird eine inerte²⁴ Flüssigkeit, beispielsweise 3M™ Novec™ High-Tech-Flüssigkeit der Firma 3M Deutschland GmbH [54], verwendet. Diese umströmt die Batteriezellen und stellt einen guten Wärmeübergang und eine gute Temperaturhomogenität sicher. Aufgrund hoher Anforderungen an die wärmeübertragende Flüssigkeit wird diese Möglichkeit selten eingesetzt. Zu dem anderen wird eine direkte Zellenbeheizung mittels elektrischer Heizelemente genutzt. Dabei werden Thermofolien verwendet und in der Nähe der Zellen bzw. zwischen diesen eingebaut. Über eine direkte Widerstandsheizung werden die Batteriezellen schnell und effektiv erwärmt. Verfügen die Heizfolien allerdings nicht über einen PTC-Effekt²⁵, sind an die Ansteuerung der elektrischen Elemente und an die Überwachung der Temperatur sehr hohe Sicherheitsanforderungen gestellt. Die direkte Zellbeheizung ist eine angewandte Heizmethode. Bei der **indirekten Zellerwärmung** heizen elektrische Heizelemente die angrenzenden Flächen oder das Kühlmittel auf. Der dadurch entstehende Wärmetransfer findet aufgrund der beteiligten thermischen Massen und des Wärmepfads gegenüber der direkten Beheizung verzögert statt. Besonders eine Erwärmung des Kühlmittels stellt für das Gesamtthermomanagement eines Fahrzeugs eine interessante Lösung dar. Diese hat den Vorteil, dass sowohl für die Kühlung als auch für die Heizung des Batteriesystems die gleichen Wärmeübertragungselemente verwendet werden können. Neben den elektrischen Heizelementen werden auch Wärmepumpen genutzt. Letztere entnehmen Wärme aus der Luft oder aus einem anderen Kühlmittelkreislauf und stellen diese auf einem höheren Temperaturniveau zu der Verfügung. Der dabei genutzte Kältemittelkreisprozess wird in dem Kapitel 2.6.3 beschrieben. [53]

Neben einem Batteriesystem stellt eine Brennstoffzelle bzw. ein Brennstoffzellensystem einen bedeutenden Energiewandler in alternativen Antriebsvarianten dar. In dem folgenden Unterpunkt wird deshalb detailliert auf diesen Energiewandler eingegangen.

²⁴ Inert: lat. für unbeteiligt, träge, untätig. In dem Kontext inerte Flüssigkeit, werden Flüssigkeiten bezeichnet, welche mit potenziellen Reaktionspartnern nicht oder nur in einem verschwindend geringen Maß reagieren.

²⁵ PTC-Effekt: engl. positive temperature coefficient; z. Dt. ansteigender, ohmscher Widerstand mit steigender Temperatur.

2.5.2 Brennstoffzelle und Brennstoffzellensystem

Eine Brennstoffzelle ist ähnlich einer Batteriezelle aufgebaut und ist ebenfalls ein elektrochemischer Wandler. In dem Unterschied zu einer Batteriezelle wird bei einer Brennstoffzelle die chemisch gebundene Energie durch eine kontinuierliche Zuführung der Reaktanden bereitgestellt und mittels einer sog. kalten Verbrennung direkt in elektrische Energie und in Wärme umgesetzt. Die Abbildung 2-12 visualisiert den Aufbau einer Brennstoffzelle.

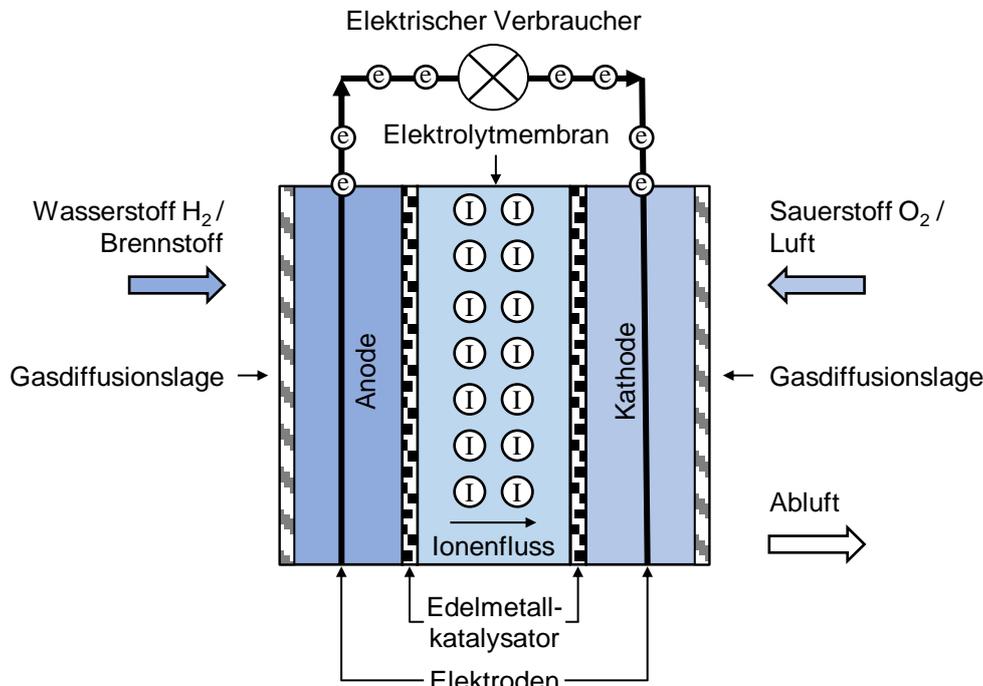
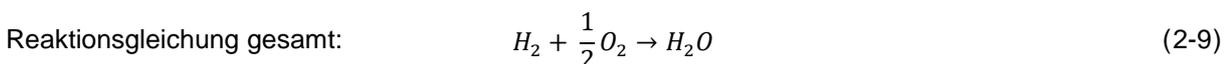
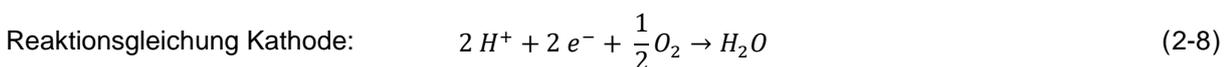
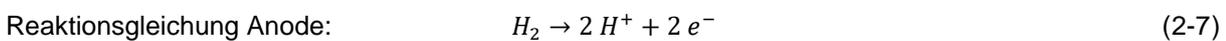


Abbildung 2-12 Allgemeiner Aufbau einer Brennstoffzelle nach [55]

Eine Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden, einer Anode und einer Kathode, zwei Gasdiffusionslagen, zwei Schichten Edelmetallkatalysator und einer protonenleitenden Elektrolytmembran. An der Anode wird ein Brennstoff zugeführt, über die Gasdiffusionslage flächig verteilt und an dem Edelmetallkatalysator oxidiert, während an der Kathode Sauerstoff analog bereitgestellt wird. Durch eine entstehende Potenzialdifferenz bewegen sich H^+ -Ionen über die ionenleitfähige Elektrolytmembran und freie Elektronen e^- der Anode über einen elektrischen Verbraucher zu der Kathode. Bei diesem Vorgehen wird Sauerstoff reduziert und Wasser gebildet. Alkohole, Kohlenwasserstoffe, wasserstoffhaltige Gasmischungen und reiner Wasserstoff werden als Brennstoff für eine Brennstoffzelle verwendet. [55] Die folgenden drei Gleichungen beschreiben die dabei ablaufenden Reaktionen:



Bei einer Temperatur von 25 °C ergibt sich durch die beiden Standardelektrodenpotenziale eine theoretische Zellspannung U_{Rev} von 1,23 V. Das theoretische Spannungsniveau wird durch Spannungsverluste reduziert. Die Abbildung 2-13 stellt die verschiedenen Verluste und die resultierende, nutzbare Zellspannung U_Z über der Stromdichte dar. Zu den Verlusten zählt die Ruhe- U_R , die Durchtritts- U_D , die Ohm'sche U_O und die Konzentrationsüberspannung U_K . Die Ruheüberspannung resultiert zu dem größ-

ten Anteil aus der Permeation²⁶ der beiden Reaktanden und aus einer begrenzten elektrischen Isolationswirkung der Elektrolytmembran. Durch eine daraus entstehende Mischpotenzialbildung wird das Elektrodenpotential herabgesetzt. Die Durchtrittsüberspannung ist notwendig, da sich in einem Gleichgewichtszustand der Hin- und der Rückreaktion, Gleichung 2-7 und Gleichung 2-8, kein Protonenstrom in oder aus dem Elektrolyten ergibt. Mit dem Ziel diesen zu forcieren und somit eine nutzbare Leistung aus der Zelle zu beziehen, werden die Elektroden polarisiert. Das Potenzial der Anode wird dabei erhöht, während jenes der Kathode erniedrigt wird. Die nutzbare Differenz der Spannung der Elektroden wird damit reduziert. Die Ohm'sche Überspannung beruht auf einem Abfall der Spannung aufgrund eines gehemmten Ladungstransports durch die ionischen als auch durch die elektrischen Leiter. Die dabei auftretende Verringerung der Spannung ist linear abhängig von der Stromstärke. Die Konzentrationsüberspannung beschreibt den Effekt einer Abnahme der Konzentration der Reaktanden bei hohen Stromdichten aufgrund einer, für die Bereitstellung der Edukte mit der Rate des Reaktionsumsatzes, notwendigen Etablierung eines Strömungsgefälles zwischen Strömungskanal und aktiver Zone. Durch diesen Effekt nimmt die Konzentrationsüberspannung progressiv mit der Stromdichte zu. [56]

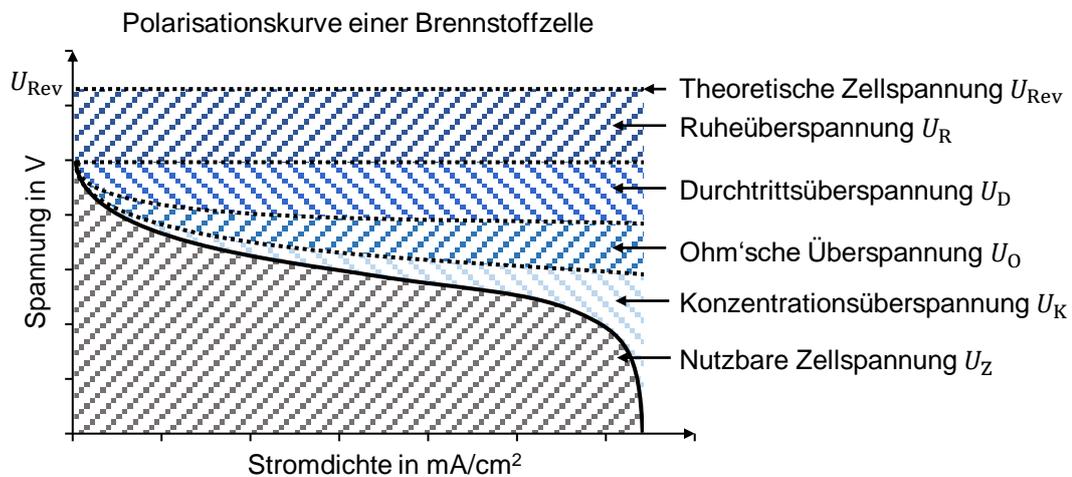


Abbildung 2-13 Darstellung der Spannungsverluste einer Brennstoffzelle nach [56]

Für eine technische Nutzung einer Brennstoffzelle in dem Automobilbereich muss eine erhöhte Spannungsebene sichergestellt werden. Typischerweise liegt die benötigte Spannung zwischen 300 V und 450 V. Einzelne Brennstoffzellen werden seriell zu einem sogenannten Brennstoffzellenstack verschaltet, um den geforderten Bereich der Spannung zu erreichen. Die Abbildung 2-14 stellt eine Verschaltung dieser inkl. einer Detailansicht einer Einzelzelle (MEA, Membran-Elektroden-Anordnung) dar. [55]

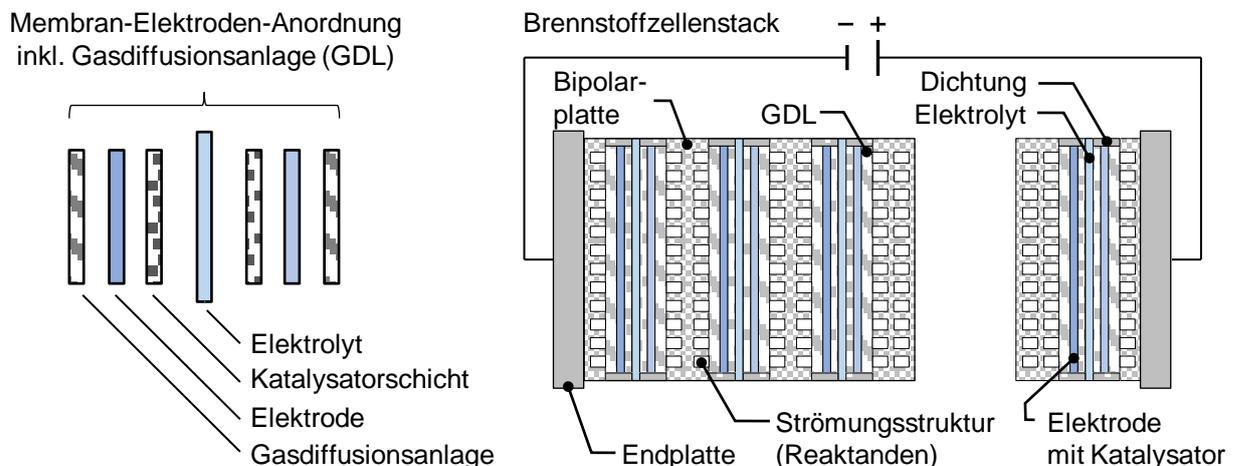


Abbildung 2-14 Aufbau einer Membran-Elektroden-Einheit und eines Brennstoffzellenstacks nach [55]

²⁶ Permeation: Fachbegriff für ein Durchwandern eines Stoffes (Permeat) durch einen Festkörper.

Über die beiden Endplatten werden die gereihten MEAs und die Bipolarplatten zu einem Brennstoffzellenstapel verspannt. Die zwischen den Zellen verbauten Bipolarplatten erfüllen sowohl die Aufgaben einer Medienzu- und einer Medienabführung als auch die Sicherstellung der elektrischen Anbindung der Elektroden. Über die eingebauten Abdichtungen der aktiven Flächen werden Leckströme unterbunden. Etwa 300 Brennstoffzellen bis etwa 450 Brennstoffzellen werden zu einem Brennstoffzellenverbund verschaltet, um eine ausreichend hohe Leistung für einen Pkw-Antrieb, in dem Bereich von ca. 60 kW bis ca. 100 kW, zu der Verfügung zu stellen. Wie die Abbildung 2-15 zeigt, ist ein so erzeugter Brennstoffzellenstapel ein essenzielles Element eines Brennstoffzellensystems. Neben einem Brennstoffzellenstapel spielt sowohl eine Medienzu- und eine Medienabführung als auch ein thermisches Management eine wichtige Rolle. Ein, für die Reaktion, notwendiger Wasserstoff wird in dem Pkw-Bereich typischerweise in einem Wasserstoffspeicher bei 700 bar gespeichert und über einen Druckminderer mit ca. 10 bar einem Brennstoffzellenverbund zugeführt. Alternative Speichermethoden sind unter anderem in [57] beschrieben. Über ein Rezirkulationsgebläse wird ein nicht verbrauchter Wasserstoff in einem Kreis geführt. Eine Luftversorgung des Systems erfolgt über die Umgebungsluft. Diese wird durch einen Luftverdichter angesaugt und bei einem Druck von ca. 2 bar dem Brennstoffzellenstapel zu der Verfügung gestellt. Über einen Gas-Gas-Befeuchter wird die zugeführte Luft mit Wasser angereichert, um einen günstigen Zustand für den Ionentransport durch die Membran zu gewährleisten. Die entstehende Abluft tritt über die Turbinenstufe des Luftverdichters aus. [58]

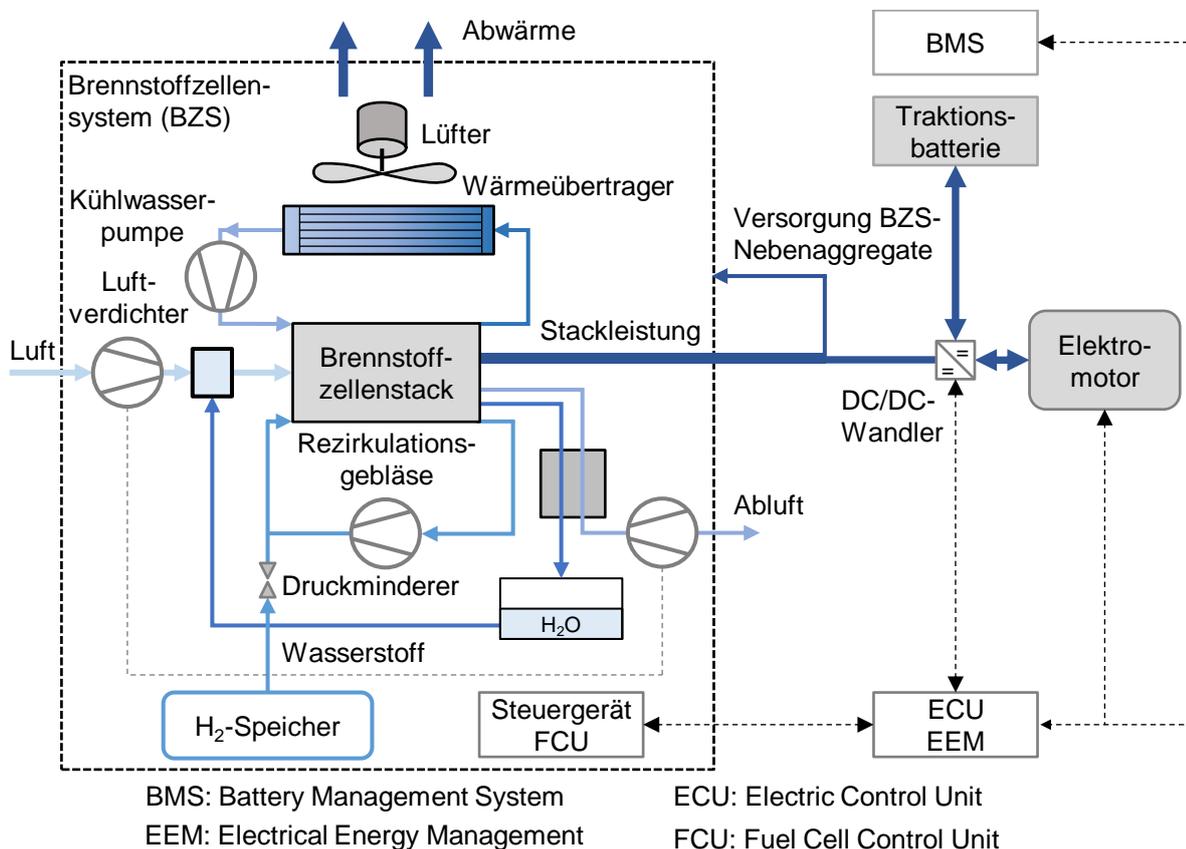


Abbildung 2-15 Aufbau eines Brennstoffzellensystems inkl. einem elektrischen Antrieb nach [58]

Die Summe der durch die Brennstoffzellen bereitgestellten Leistung wird als Stackleistung bezeichnet. Diese ist jedoch nicht vollumfänglich nutzbar, da die benötigten Systemkomponenten versorgt werden müssen. Speziell die parasitäre Leistung des Luftverdichters, welche in einem niedrigen kW-Bereich liegt, ist hier zu nennen. Die verbleibende Leistung des Brennstoffzellenstapels wird über einen DC/DC-Wandler gestellt und steht dem elektrischen Antriebsstrang zu der Verfügung. Dieser ist mit einer elektrischen Antriebseinheit, bestehend aus einem Inverter, einem Elektromotor und einem Getriebe, und mit einem Batteriesystem ausgestattet, um die Möglichkeit der Rekuperation zu nutzen und

bei Leistungssprüngen zu unterstützen. Über eine elektrische Steuereinheit, ECU, wird das Zusammenspiel zwischen dem Batteriesystem, der elektrischen Antriebseinheit und dem Brennstoffzellensystem, und somit die jeweilige Leistungsbereitstellung, geregelt. Die Abbildung 2-16 stellt einen quantitativen Verlauf des Wirkungsgrads eines Brennstoffzellenstapels und jenem eines Brennstoffzellensystems über der Leistung dar. Während der Wirkungsgrad des Erstgenannten kontinuierlich sinkt, steigt jener des Letztgenannten aufgrund der parasitären Leistungen zunächst stark an und fällt anschließend flach ab. Basierend auf einem, durch die parasitären Leistungen, anfänglich schlechten Wirkungsgrad wird ein Brennstoffzellensystem erst ab einer Mindestleistung effektiv betrieben. In der Praxis liegt der maximale Wirkungsgrad eines Brennstoffzellensystems, verbaut in einem aktuellen Brennstoffzellenfahrzeug, zwischen ca. 50 % und ca. 60 % [59]. [58]

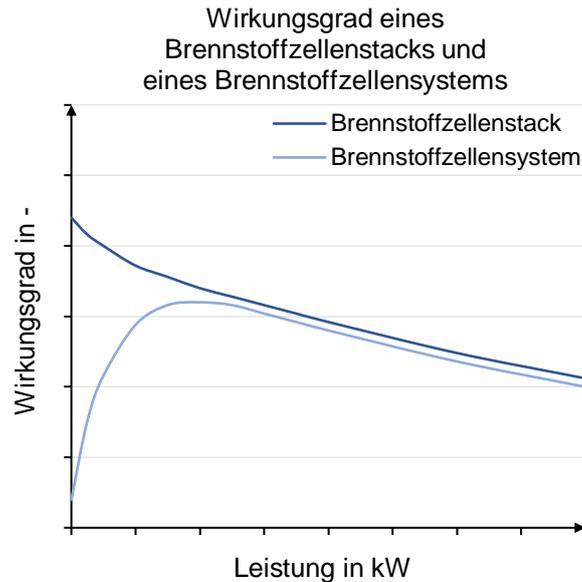


Abbildung 2-16 Wirkungsgrad eines Brennstoffzellenstapels und eines Brennstoffzellensystems über der Leistung nach [58]

Der Wirkungsgrad eines Brennstoffzellensystems ist durch den Quotienten aus elektrisch nutzbarer zu chemisch gebundener Energie definiert. Die nicht in elektrische Form umgewandelte elektrochemisch gebundene Energie wird in Wärme umgesetzt. Der primäre Anteil der entstehenden Verlustleistung tritt direkt in der Brennstoffzelle und somit in dem Brennstoffzellenstapel auf. Eine ausreichende Kühlleistung wird implementiert, um thermische Schäden der Komponenten zu verhindern. Neben der Hauptverlustleistung in den Zellen werden die Nebenaggregate Luftverdichter, DC/DC-Wandler und Rezirkulationsgebläse ebenfalls aktiv gekühlt. Die Abbildung 2-17 zeigt einen dazu notwendigen Aufbau einer Brennstoffzellensystemkühlung. Der linke Kühlkreislauf der Abbildung wird aufgrund der Solltemperatur der Brennstoffzellen, welche bei ca. 85 °C [58] liegt, als Hochtemperaturkreislauf (HT-Kreislauf) bezeichnet. In diesem sind neben dem Brennstoffzellenstapel der Kathodenluft-Wärmeübertrager, ein Ionentauscher, eine Kühlwasserpumpe und zwei Wärmeübertrager verbaut. Durch die Kühlwasserpumpe wird ein benötigter, deionisierter Kühlmittelmassenstrom geregelt und die Betriebstemperatur der Komponenten gemeinsam mit der Bypass-Stellung zu dem Hochtemperatur-Kühler reguliert. Das anfangs kühle Kühlmittel durchströmt den Brennstoffzellenstapel und den Kathodenluft-Wärmeübertrager und erwärmt sich dabei. Das Kühlmittel wird bis zu dem Erreichen einer Solltemperatur über einen Bypass in dem Kreis geführt und nicht über den HT-Kühler abgekühlt oder der Kabine zu dem Aufwärmen zu der Verfügung gestellt. Sobald die Solltemperatur erreicht ist, wird in einem Bedarfsfall der Kabine Wärme über einen Heizungswärmeübertrager zugeführt. Die restliche Abwärme wird, über einen Wärmeübertrager, zu der Umgebung abgegeben. Bei einem BZS wird in dem Vergleich zu einem Verbrennungsmotor weniger Wärme über die Abluft aus dem System entnommen. Deshalb wird der Kühler ausreichend dimensioniert. Der rechte Kühlkreislauf der Abbildung 2-17 beinhaltet diverse Nebenaggregate

des BZSs und die Kühlungsanbindung des Elektromotors und der Leistungselektronik (Pulswechselrichter). Der Kreislauf wird aufgrund eines geringeren Niveaus der Solltemperatur, ca. 50 °C bis ca. 70 °C, als Niedrigtemperaturkreislauf (NT-Kreislauf) bezeichnet. Über eine Kühlmittelpumpe wird der Kühlmittelmassenstrom geregelt und über einen Niedertemperatur-Kühler abgekühlt. [58]

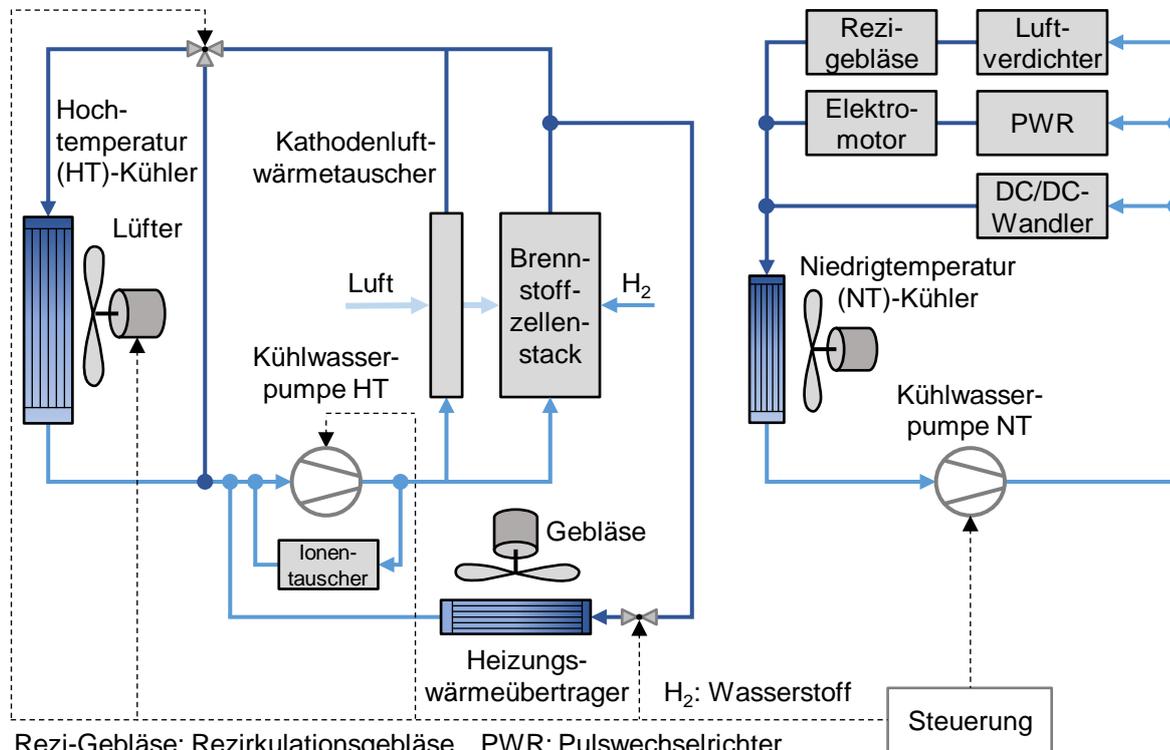


Abbildung 2-17 Prinzipieller Aufbau der Kühlkreisläufe eines Brennstoffzellensystems nach [58]

Die Abbildung 2-18 zeigt, wie ein Brennstoffzellensystems praktisch realisiert wird. In der Darstellung ist der Aufbau des Wasserstofftankensystems und jener des Brennstoffzellensystems des aktuellen Brennstoffzellenfahrzeugs Mercedes-Benz GLC F-CELL der Firma Daimler AG visualisiert. Auf der linken Seite ist das Wasserstoffspeichersystem mit einem in dem Mittelunnel und einem unter der Rücksitzbank angebrachten H₂-Tank dargestellt. Das gezeigte Tanksystem steht mit 700 bar unter Druck und fasst 4,4 kg Wasserstoff, was einem Energieinhalt von ca. 147 kWh entspricht. Auf der rechten Seite der Abbildung ist das, unter der Motorhaube untergebrachte, Brennstoffzellensystem zu sehen. Dieses wird zu dem ersten Mal in jenem für den konventionellen Motor vorgesehenen Bauraum verbaut. Durch die Verringerung des Bauraums wird der Bedarf eines verstärkten Unterbodens umgangen und das Brennstoffzellensystem kann in verschiedene Fahrzeugvarianten variabel implementiert werden.



Abbildung 2-18 Aufbau des Wasserstofftankensystems (links) und des Brennstoffzellensystems (rechts) des Brennstoffzellenfahrzeugs Mercedes-Benz GLC F-CELL der Firma Daimler AG [60]

Bei dem bereits beschriebenen Batterie- und Brennstoffzellensystem handelt es sich um Energiewandler, welche die benötigte Leistung für einen elektrifizierten Antriebsstrang in Form von Gleichspannung und Gleichstrom zu der Verfügung stellen. Das bereitgestellte Spannungsniveau und die bereitgestellte Stromart, d. h. die Wahl von Gleich- oder von Wechselstrom, muss für eine Nutzung einer elektrischen Maschine angepasst werden. Durch eine geeignete Leistungselektronik wird dies realisiert.

2.5.3 Leistungselektronik

Eine Leistungselektronik dient in dem Allgemeinen der Umwandlung einer Spannungs- oder einer Stromart. Wie die Abbildung 2-19 zeigt, werden elektrischen Energiewandler generell in die vier Wandlungsarten Wechselrichter, Wechselstromumrichter, Gleichrichter und Gleichstromwandler untergliedert. Ein Wechselrichter wandelt einen Gleich- in einen Wechselstrom und ein Gleichrichter einen Wechsel- in einen Gleichstrom. Ein Wechselstromumrichter und ein Gleichstromwandler wandeln jeweils die Spannung und halten die jeweilige Stromart gleich. Eine elektrische Leistung kann in der Regel in beide Richtungen übertragen werden. Ein Strom- bzw. eine Spannungswandlung erreicht in der Praxis, in der Leistungsklasse des Automobilbereichs, Wirkungsgrade in einem Bereich von ca. 95 % bis ca. 98 % [61]. Als grundlegende Leistungsbaulemente werden unter anderem MOSFETs²⁷ und IGBTs²⁸, sowie Dioden als auch Spulen eingesetzt. [48]

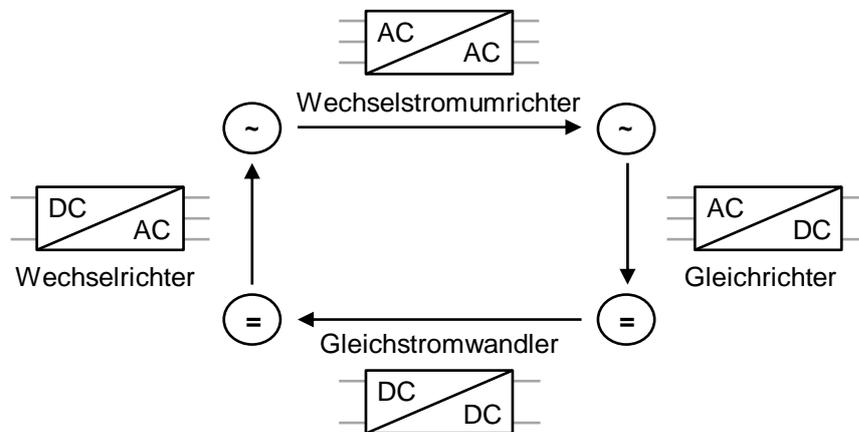


Abbildung 2-19 Schaubild der elektrischen Energiewandler nach [48]

Speziell durch eine Fortschreitung der Elektrifizierung des Antriebsstrangs hat die Leistungselektronik in dem Automobilbereich nochmals deutlich an Bedeutung gewonnen. Die Abbildung 2-20 stellt anhand einer Verschaltung der elektrischen Komponenten eines Batteriefahrzeugs beispielhaft den vermehrten Einsatz elektrischer Baugruppen dar.

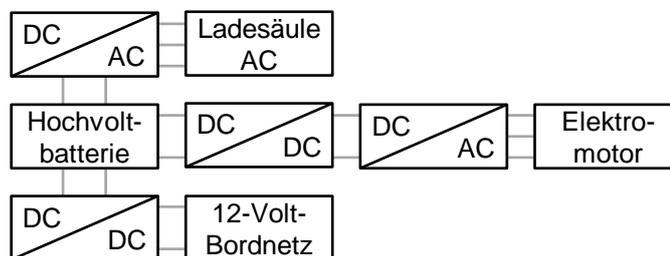


Abbildung 2-20 Verschaltung der elektrischen Komponenten anhand eines BEVs nach [62]

In der gezeigten Verschaltung wird eine Hochvolt-Batterie extern über eine AC-Ladesäule geladen. Aus diesem Grund wird ein Gleichrichter zwischen die Ladesäule und die HV-Batterie geschaltet, da für eine

²⁷ MOSFET: Akronym für Metall-Oxid Feldeffekttransistor.

²⁸ IGBT: Akronym für Insulated-Gate Bipolar Transistor.

Batterieraufladung eine Gleichspannung notwendig ist. Soll ein Batteriesystem hingegen mit einer DC-Ladesäule eines anderen Spannungsniveaus geladen werden, wird ein Gleichstromwandler eingesetzt. Zu der Versorgung des 12-Volt-Bordnetzes wird in diesem Beispiel ein weiterer Gleichstromwandler eingebaut, um die Spannung des Batteriesystems von etwa 300 V auf etwa 12 V anzupassen. Zudem wird die Gleichspannung eines Batterie- oder eines Brennstoffzellensystems in eine Wechselspannung gewandelt, um die aktuell eingesetzten Elektromotoren alternativer Antriebe zu betreiben. Für die Realisierung dessen kann zunächst ein Gleichstromwandler und anschließend ein Wechselrichter verbaut sein, vgl. dazu Abbildung 2-20. Die dabei verwendete Leistungselektronik versorgt einen Elektromotor bedarfsgerecht. Abhängig ob angetrieben oder ob verzögert wird, wandelt ein Elektromotor die bereitgestellte elektrische in mechanische Energie, oder eine mechanische in eine elektrische Energie um. Folgend wird ein Elektromotor bzw. eine elektrische Antriebseinheit beschrieben. [62]

2.5.4 Elektromotor und elektrische Antriebseinheit

Sowohl bei Elektrofahrzeugen als auch bei hybridisierten Fahrzeugen wird ein Elektromotor verbaut. Dieser wandelt eine bereitgestellte elektrische Leistung in eine mechanische um, um beispielsweise den Antrieb des Automobils zu gewährleisten. Die Funktionsweise einer elektrischen Maschine basiert auf der Lorentz- oder auf der Reluktanzkraft. Während Letztere durch eine Änderung eines magnetischen Widerstands erzeugt wird, wird die Lorentzkraft durch eine Wechselwirkung zwischen einem stromdurchflossenen Leiter und einem magnetischen Feld hervorgerufen. Die Abbildung 2-21 zeigt lediglich die Wirkweise der Lorentzkraft auf. Da die Reluktanzkraft, bei den in dem Automobilbereich aktuell überwiegend eingesetzten Elektromotoren, vernachlässigbar ist, wird auf diese nicht weiter eingegangen. Weiterführende Informationen über die Reluktanzkraft sind in [63] und in [64] gegeben.

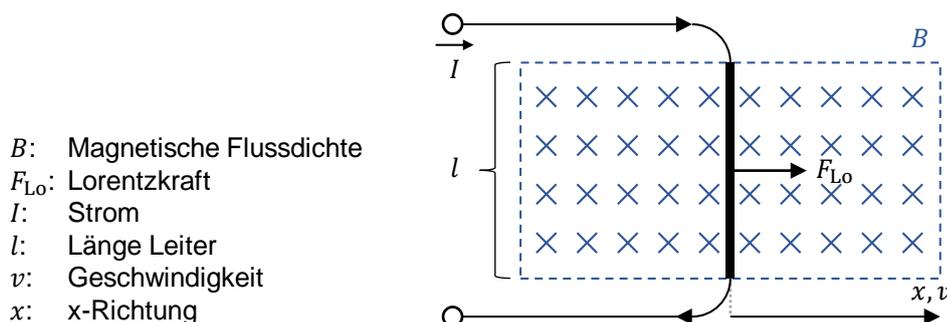


Abbildung 2-21 Darstellung der Wirkweise der Lorentzkraft nach [55]

Wird ein Leiter mit einem translatorischen Freiheitsgrad in x -Richtung und einer Länge l mit einem Strom I durchflossen und befindet sich dieser in einem konstanten, homogenen, magnetischen Feld mit einer Flussdichte B , wirkt auf den Leiter die Lorentzkraft F_{Lo} . Die Richtung der resultierenden Kraftwirkung wird mit der sog. Drei-Finger-Regel [65] bestimmt und mit der Gleichung

$$F_{Lo} = l \cdot B \cdot I \quad (2-10)$$

berechnet. Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, wird in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v mit dem Zusammenhang

$$U = l \cdot B \cdot v \quad (2-11)$$

eine Spannung U induziert. Durch das Einsetzen von der Gleichung 2-10 in die Gleichung 2-11 wird der Zusammenhang zwischen einer elektrischen und einer mechanischen Leistung mittels

$$P = F_{Lo} \cdot v = U \cdot I \quad (2-12)$$

beschrieben.

Ein Elektromotor wird mit Wicklungen ausgestattet, um ein sich drehendes Magnetfeld zu erzeugen. Die Abbildung 2-22 zeigt einen prinzipiellen Aufbau mit nur einer Wicklung und einen mit drei Wicklungen. Durch einen konstanten Stromfluss durch eine Wicklung bildet sich ein konstantes, homogenes Magnetfeld aus, vgl. Abbildung 2-22 links. Werden die Wicklungen in Abhängigkeit der Position des Rotors mit unterschiedlichen Stromstärken durchflossen, wird ein sich drehendes und homogenes Magnetfeld erzeugt, vgl. Abbildung 2-22 rechts. Das sich drehende Magnetfeld wirkt auf den Rotor und prägt diesem eine Drehbewegung auf. Den dafür notwendigen, zeitaufgelösten Stromfluss regelt ein Wechselrichter. In [66] sind Informationen bzgl. einer notwendigen Regelung eines Elektromotors enthalten.

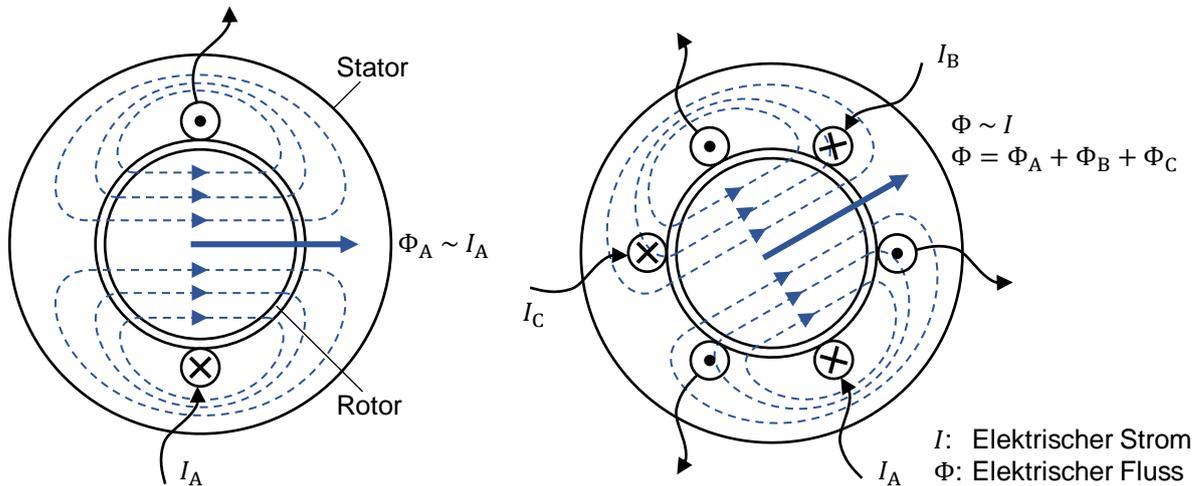


Abbildung 2-22 Aufbau der Feldlinien in einer Drehstrommaschine nach [55]

Wie die Abbildung 2-23 zeigt, wird eine elektrische Maschine in einem Drehzahl-Drehmomenten-Kennfeld in vier Quadranten betrieben. Ein elektrischer Motor wird somit motorisch oder generatorisch eingesetzt. Das bedeutet, dass entweder elektrische in mechanische oder mechanische in elektrische Leistung umgewandelt wird. Diese Einsatzmöglichkeit stellt für eine Nutzung eines Fahrzeugs eine wichtige Eigenschaft dar. Durch die Möglichkeit des Wechsels der Betriebsart wird mit einer identischen Maschine das Fahrzeug sowohl angetrieben als auch abgebremst. Bei einem Verzögern kann mittels des Elektromotors Bremsenergie zurückgewonnen werden, was die Energieeffizienz positiv beeinflusst. [62]

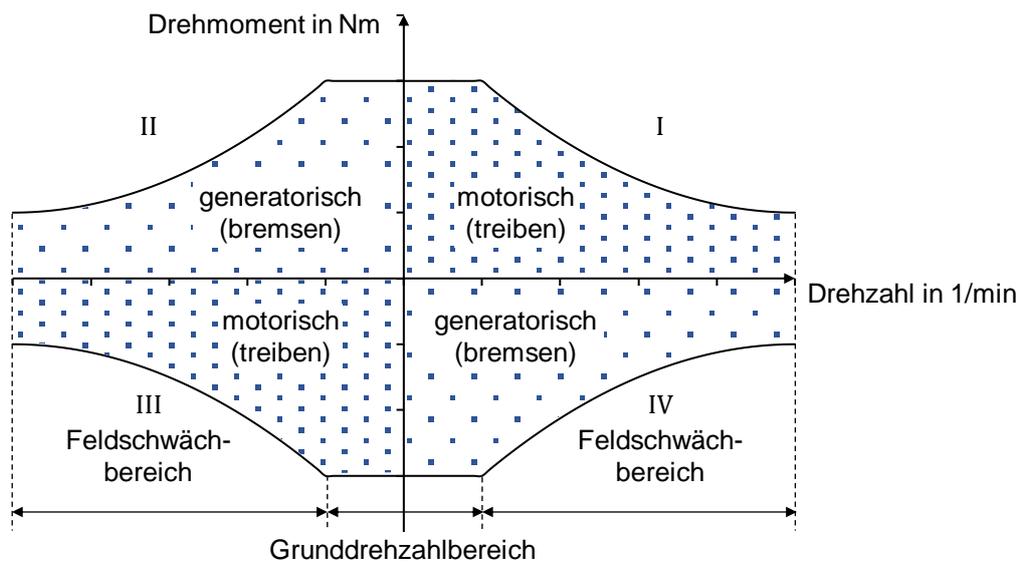


Abbildung 2-23 Betrieb einer elektrischen Maschine in vier Quadranten nach [62]

Neben der Möglichkeit einer Rekuperation bietet ein elektrischer Antrieb weitere Vorteile gegenüber einem Verbrennungsmotor. Dazu zählen unter anderem ein über das gesamte Drehzahlband deutlich höherer, kombinierter Wirkungsgrad (Elektromotor inkl. Batteriesystem und Leistungselektronik) und ein nahezu unverzögert verfügbares Moment. Aktuelle, in dem Automobilbereich eingesetzte, elektrische Antriebseinheiten – Leistungselektronik und Elektromotor, erreichen in dem Bestpunkt einen kombinierten Wirkungsgrad von 90 % und höher. Die Abbildung 2-24 zeigt hierfür beispielhaft ein Wirkungsgradkennfeld einer permanent erregten Synchronmaschine (PSM) inkl. dessen Leistungselektronik.

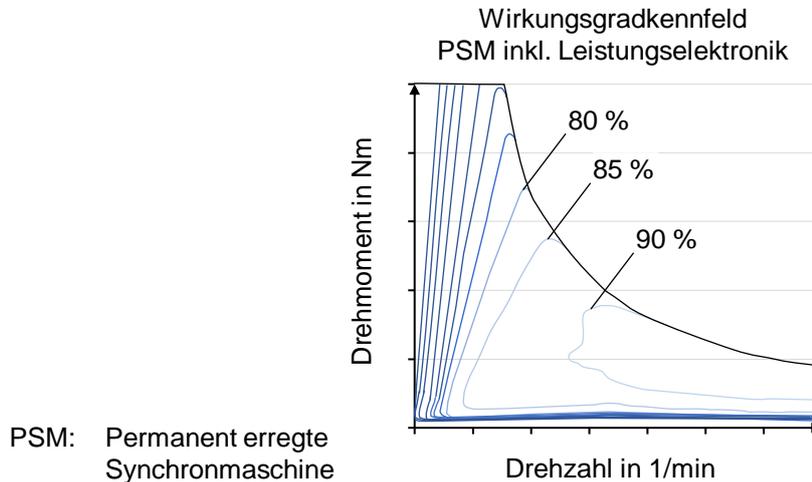


Abbildung 2-24 Wirkungsgradkennfeld einer PSM inkl. Leistungselektronik nach [62]

Die Abbildung 2-25 stellt die typischen Verläufe des Drehmoments und der Leistung über der Drehzahl eines Elektromotors einem Verbrennungsmotor (VM) gegenüber. Während bei einem VM zunächst die Leerlaufdrehzahl überwunden werden muss, kann bei einem Elektromotor direkt das volle Moment genutzt werden. Dieses liegt, bis zu der sog. Eckdrehzahl n_{Eck} , konstant an und nimmt in dem sog. Feldschwäbchbereich, vgl. Abbildung 2-23, annähernd in einem quadratischen Verlauf ab. Die resultierende Leistung steigt damit zunächst linear an und verharrt anschließend in etwa auf ihrem Maximalwert. Die Leistung einer elektrischen Antriebseinheit ist thermisch begrenzt. Aufgrund der großen, thermischen Massen und den resultierenden Zeitkonstanten werden Elektromotoren kurzzeitig überlastet, um eine erhöhte Leistung abzufragen. Bei der Auslegung einer elektrischen Antriebseinheit werden deshalb eine Spitzen- und eine Dauerleistung berücksichtigt. Die Charakteristik eines VMs ist aufgrund seiner Funktionsweise gegenüber einem Elektromotor grundlegend unterschiedlich, vgl. dazu Kapitel 2.5.5. [48]

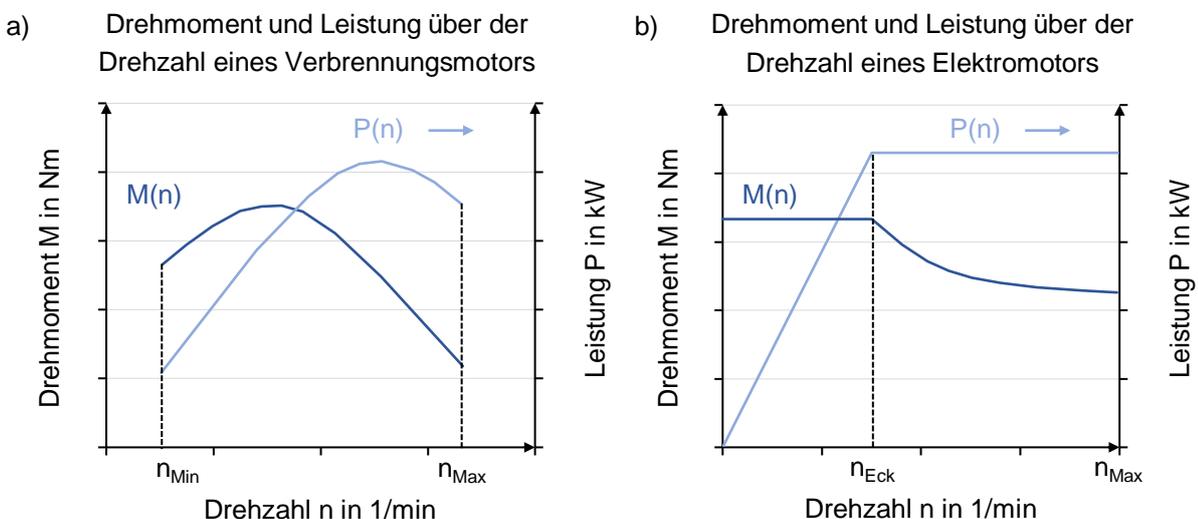


Abbildung 2-25 Qualitativer Verlauf des Drehmoments und der Leistung über der Drehzahl a) für einen Verbrennungs- und b) für einen Elektromotor nach [48]

Bei dem gezeigten Verlauf des Drehmoments und der Leistung einer elektrischen Maschine handelt es sich um theoretische Verläufe. Diese werden in der Praxis nicht erreicht, da immer Verlustmechanismen auftreten. Für Synchronmaschinen werden diese nach [67] in Kupfer- $P_{V,Cu}$, in Eisen- $P_{V,Fe}$, in Reibungs- $P_{V,R}$ und in Zusatzverluste $P_{V,Zu}$ untergliedert. Die Abbildung 2-26 zeigt den Leistungsfluss durch eine elektrische Maschine und die Aufteilung der Verluste. Kupferverluste implizieren stromflussbedingte Verluste der Leiter. Eisenverluste basieren auf einer permanenten Ummagnetisierung. Reibungsverluste repräsentieren auftretende mechanische Verluste, beispielsweise die Lager-, oder die Luftspaltreibung und Zusatzverluste spiegeln weitere Verluste, beispielsweise beruhend auf harmonische Frequenzen, wider. In [68] werden die Effekte detailliert beschrieben. [67]

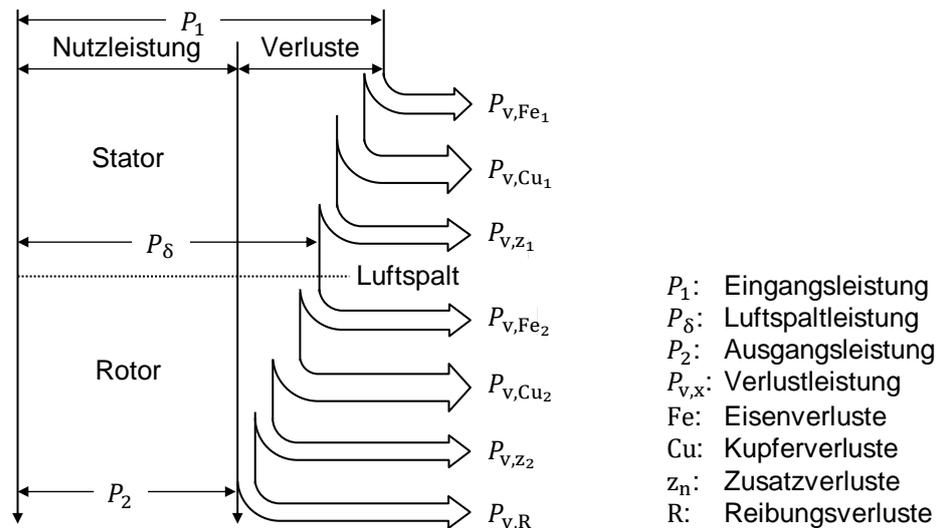


Abbildung 2-26 Leistungsfluss und Verluste einer elektrischen Maschine nach [67]

Die genannten Verlustmechanismen einer elektrischen Maschine, jene eines Inverters und jene einer Übersetzungsstufe führen dazu, dass sich eine elektrische Antriebseinheit während des Betriebs erwärmt und in den Leistungsklassen innerhalb der Pkws aktiv gekühlt werden muss. Die Abbildung 2-27 a) zeigt einen beispielhaften, schematischen Aufbau einer elektrischen Antriebseinheit inkl. deren Kühlaufbau. In dieser Darstellung werden die Leistungselektronik und der Stator des Elektromotors mit Kühlmittel temperiert und das Getriebe und die Rotorwelle über eine Ölkühlung gekühlt. Während eine Kühlmittelkühlung der Leistungselektronik und des Stators als Standardvariante angesehen wird, kann die Rotorwelle anstatt der gezeigten Ölkühlung ebenfalls mit Kühlmittel durchflossen und so temperiert werden [69]. Aufgrund einer höheren Temperatursensibilität der Halbleiter, basierend auf den geringeren thermischen Massen der Halbleiter, wird in dem Allgemeinen diese zuerst durchströmt und erst anschließend der Elektromotor gekühlt. Aus einem daraus resultierenden Effekt einer höheren Temperaturdifferenz der Leistungselektronik zu dem Kühlmittel wird eine erhöhte Wärmemenge abgegeben und die Leistungselektronik effizienter temperiert. [70]

In dem Gegensatz zu der Abbildung 2-27 a) zeigt die Abbildung 2-27 b) einen realen Aufbau eines Elektromotors. Bei dem visualisierten Beispiel handelt es sich um einen Elektromotor der Mercedes-Benz C-Klasse 300 BlueTec Hybrid der Firma Daimler AG mit einer Leistung von 20 kW. Die eingesetzte elektrische Maschine dient der Elektrifizierung des konventionellen Antriebs und unterstützt einen Verbrennungsmotor, welcher in diesem Fall den Hauptantrieb darstellt. [71]

Neben einer elektrischen Antriebseinheit ist ein Verbrennungsmotor ein wichtiger Energiewandler in der Automobilindustrie. Fahrzeugvarianten, welche ausschließlich mit einem Verbrennungsmotor betrieben werden, werden in dieser Arbeit ebenfalls detailliert betrachtet. Der Aufbau eines Verbrennungsmotors wird deshalb folgend ausführlich beschrieben. Dabei werden ein vereinfachter Aufbau, die prinzipielle Funktionsweise und das Thermomanagement eines Verbrennungsmotors erläutert.

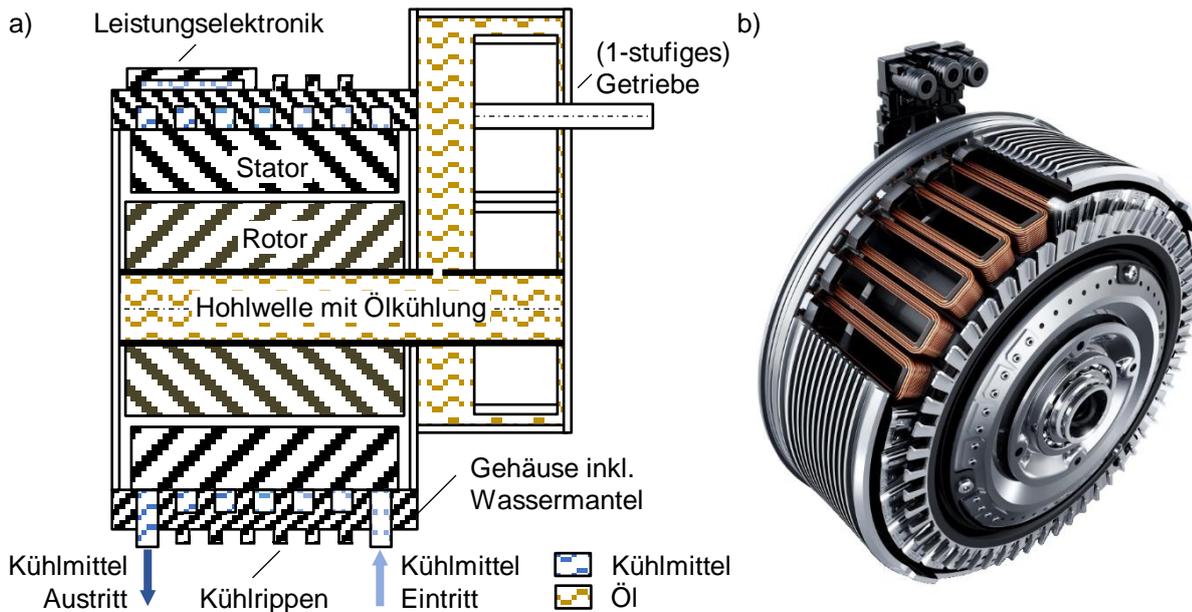


Abbildung 2-27 a) Beispielhafter, schematischer Aufbau einer elektrischen Antriebseinheit inkl. deren Kühlung nach [70] und b) reale Abbildung des Elektromotors der Mercedes-Benz C-Klasse C 300 Blue-TEC HYBRID der Firma Daimler AG mit einer Leistung von 20 kW nach [71]

2.5.5 Verbrennungsmotor

Bei einem Verbrennungsmotor handelt es sich um eine Verbrennungskraftmaschine, welche die in dem Kraftstoff gebundene chemische Energie über Zwischenschritte in eine mechanische Arbeit umwandelt. Verbrennungskraftmaschinen zählen zu den Wärmekraftmaschinen und werden als Strömungs- oder als Kolbenmaschinen klassifiziert [62]. Unter Strömungsmaschinen fallen unter anderem Fahrzeuggasturbinen oder Strahltriebwerke. Die in dem Automobilbereich überwiegend eingesetzten Motoren, der Otto- und der Dieselmotor, sind Kolbenmaschinen. Diese nutzen den Gasdruck aus einer Verbrennung aus, um eine Arbeitsleistung zu erzeugen. Die Abbildung 2-28 a) stellt den schematischen Aufbau eines Triebwerks eines Hubkolbenmotors dar. In der Darstellung erfolgt die Brennstoffbeigabe über einen Lufteinlass, was nicht für alle Motorvarianten durchführbar ist. Bei einem Direkteinspritzungssystem wird der Brennstoff über Injektoren direkt in den Brennraum eingespritzt. Der Aufbau des Triebwerks besteht aus einem Zylinderkopf mit einem Luftein- und mit einem Luftauslass und mindestens zwei dazugehörigen Ventilen. Unterhalb des Zylinderkopfs befindet sich eine Laufbuchse, welche in dem Motorblock eingearbeitet ist. In dieser bewegt sich ein Kolben inkl. Kolbenringe. Der Kolben ist mittels des Pleuelbolzens an einem Pleuel befestigt, welches mit einem Pleuelzapfen an eine Pleuelwelle angebunden ist. Bewegt sich der Pleuelwechselnd von dem oberen Totpunkt (OT) zu dem unteren Totpunkt (UT), wird die Pleuelwelle, durch die angewandte Geometrie, in eine Drehbewegung versetzt. Die so erzeugte, rotatorische Bewegung wird beispielsweise für einen Antrieb für einen Pkw genutzt. [72]

Der in einem Hubkolbenmotor ablaufende Prozess wird in einem 2-Takt-Verfahren oder in einem 4-Takt-Verfahren durchgeführt. Dabei erfolgen die Teilschritte einer Medienansaugung, einer Medienverdichtung, einer Medienexpansion und einer Medienaustragung. Während sich bei einem 4-Takt-Verfahren alle Schritte über zwei Pleuelwellenumdrehungen erstrecken, erfolgen diese bei einem 2-Takt-Verfahren während einer Pleuelwellenumdrehung. In dem Pkw-Bereich hat sich das 4-Takt-Verfahren etabliert. Aus diesem Grund wird folgend nur auf dieses eingegangen. Die Abbildung 2-28 b) visualisiert den Ablauf der vier Teilschritte eines 4-Takt-Verfahrens in einem p-V-Diagramm. Als einfachste Modelle werden geschlossene, innerlich reversible Kreisprozesse mit einer Wärmezufuhr und mit einer Wärmeabfuhr angewandt, um einen Motorprozess thermodynamisch abzubilden. Dabei werden die folgenden drei Prämissen angewandt. Eine Wärmezufuhr wird als Folge einer chemischen Umwandlung eines

Brennstoffs definiert, eine Wärmeabfuhr entspricht einem Ladungswechsel und das Arbeitsmedium Luft wird als ein perfektes Gas idealisiert angenommen. [72]

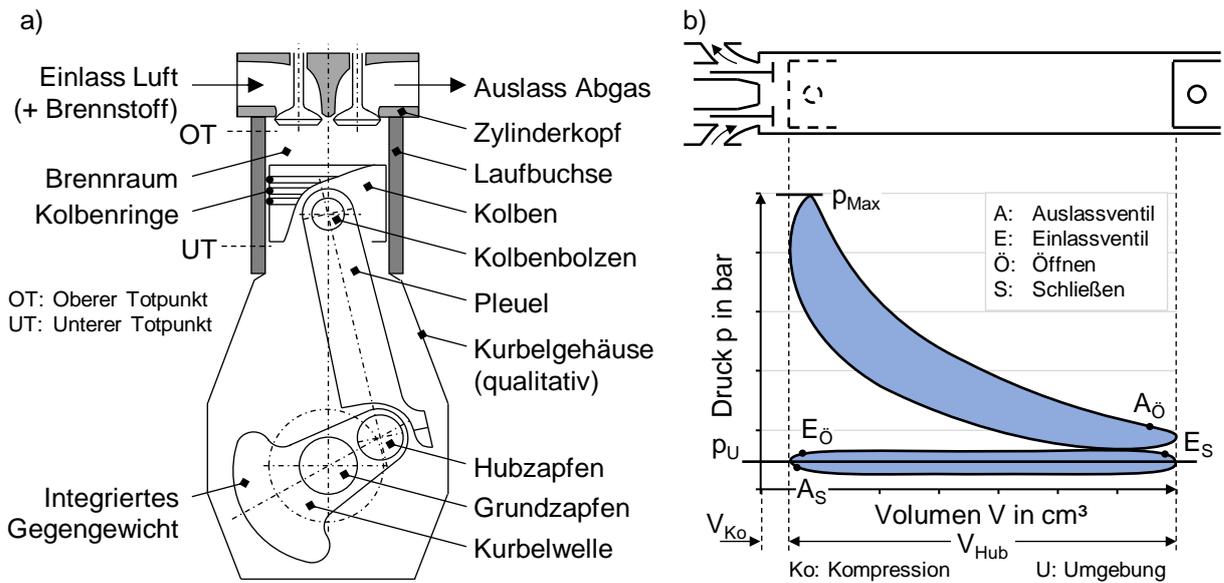


Abbildung 2-28 a) Triebwerk eines Hubkolbenmotors nach [72] und b) 4-Takt-Verfahren in einem p-V-Diagramm nach [72]

Zu den geschlossenen Kreisprozessen zählen unter anderem der Carnot-, der Gleichraum-, der Gleichdruck- und der Seiligerprozess. Die Abbildung 2-29 stellt auf der linken Seite den Gleichraum- und auf der rechten Seite den Gleichdruckprozess dar. Bei einem Gleichraumprozess erfolgt eine Wärmezufuhr bei einem konstanten Volumen, während bei einem Gleichdruckprozess Wärme bei einem konstanten Druck zugeführt wird. Aufgrund einer isochoren Wärmezufuhr ist der theoretische Vergleichsprozess eines Ottomotors der Gleichraumprozess und durch eine isobare Wärmezufuhr ist der Gleichdruckprozess Selbiges für einen Dieselmotor. [72]

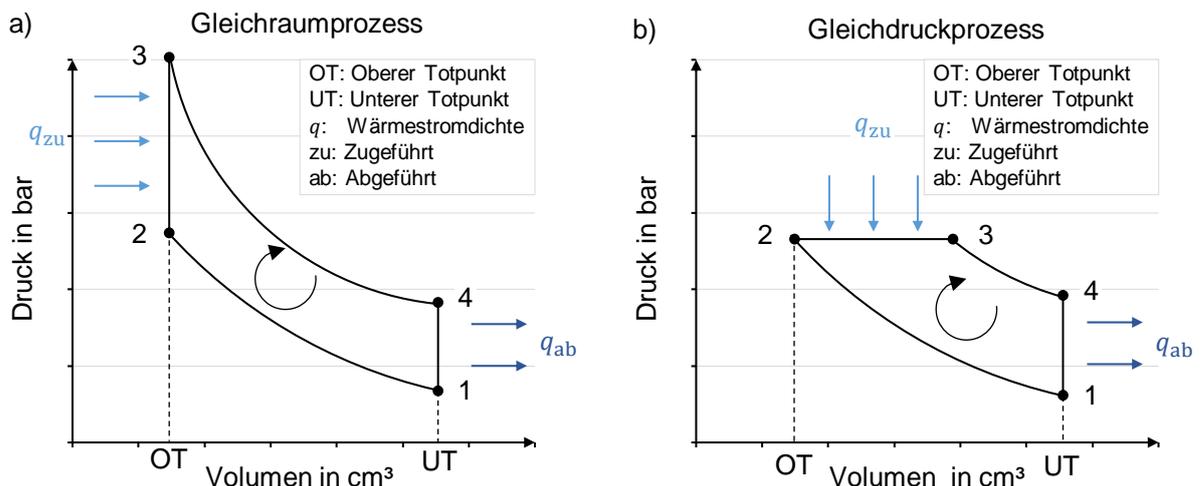


Abbildung 2-29 Gleichraum- und Gleichdruckkreisprozess in einem p-V-Diagramm nach [72]

In der praktischen Umsetzung der verschiedenen Motortypen wird ein theoretischer Vergleichsprozess aufgrund von mechanischen Verlusten, realen Ladungen / Liefergraden, unvollkommener Verbrennung, realen Verbrennungsabläufen, Wärmeverluste durch Wärmeübertragungen, Leckagen und Ladungswechselverlusten nicht erreicht [72]. In sog. Muschelkurven werden die sich praktisch ergebenden Wirkungsgrade von Verbrennungsmotoren visualisiert. Dabei wird anstelle eines Wirkungsgrads ein spezieller Verbrauch in g/kWh angegeben. Über den unteren Heizwert des jeweiligen Brennstoffs wird auf

den Wirkungsgrad zurückgerechnet. Für den Kraftstoff Benzin E5 liegt dieser bei ca. 43,2 MJ/kg und für den Kraftstoff Diesel liegt dieser bei ca. 42,1 MJ/kg [73]. Die Abbildung 2-30 zeigt die grundsätzliche Charakteristik einer Muschelkurve für einen Otto- und für einen Dieselmotor. Der spezifische Verbrauch in dem Bestpunkt liegt für das Jahr 2015 nach der JEC-Studie [74] für ein typisches Fahrzeug der Mittelklasse mit einem Ottomotor bei ca. 240 g/kWh und für ein Fahrzeug mit einem Dieselmotor bei ca. 206 g/kWh. Wie in den beiden Diagrammen zu erkennen ist, wird ein Ottomotor mit einer höheren Drehzahl betrieben, während ein Dieselmotor ein höheres, maximales Drehmoment besitzt.

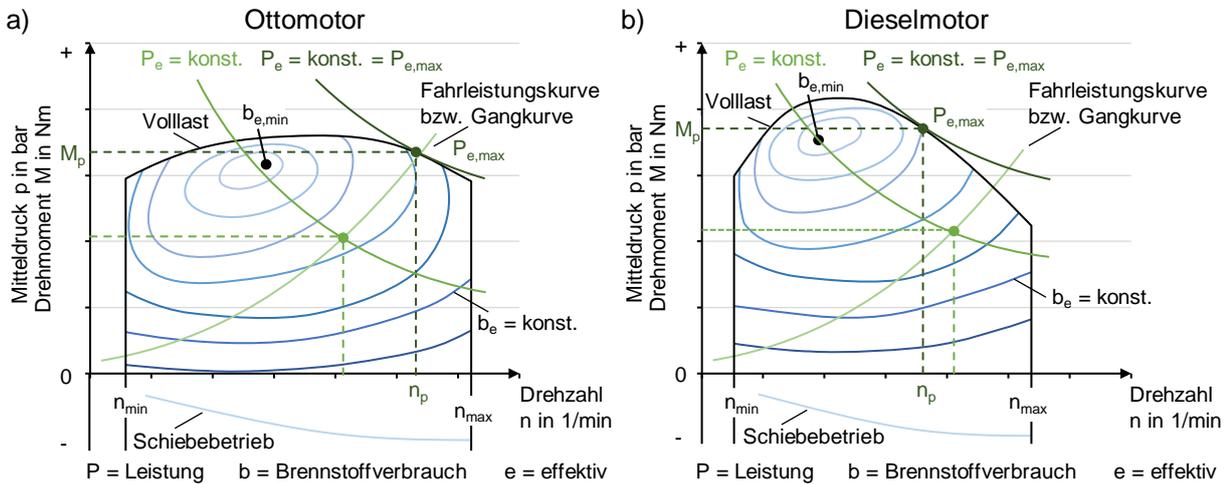


Abbildung 2-30 Charakteristik eines Verbrauchskennfelds a) für einen 4-Takt-Ottomotor und b) für einen 4-Takt-Dieselmotor nach [72]

Die Abbildung 2-31 zeigt für beide Motorvarianten die Energiebilanz für zwei Lastpunkte bei 2 000 1/min und bei 2 bar bzw. bei 12 bar Zylinderdruck. In dem Balkendiagramm ist zu erkennen, dass in dem niedrigen Druckbereich die Nutzarbeit geringer ausfällt, sich die Verluste je nach Lastpunkt unterschiedlich verteilen und dass ein Dieselmotor einen höheren Wirkungsgrad in dem Vergleich zu einem Ottomotor erzielt. Der größte Anteil der Verlustleistung ist die Abgasenthalpie. Diese wird über das Abgas ausgestoßen. Die restliche Verlustleistung teilt sich auf die Blow-by-Verluste²⁹, auf die Wandwärmeverluste und auf die Reibungen auf. Der Motor wird von den entstehenden Wärmemengen aufgeheizt. Sobald dieser seine Solltemperatur erreicht, wird die überschüssige Verlustleistung aktiv abgeführt. [62]

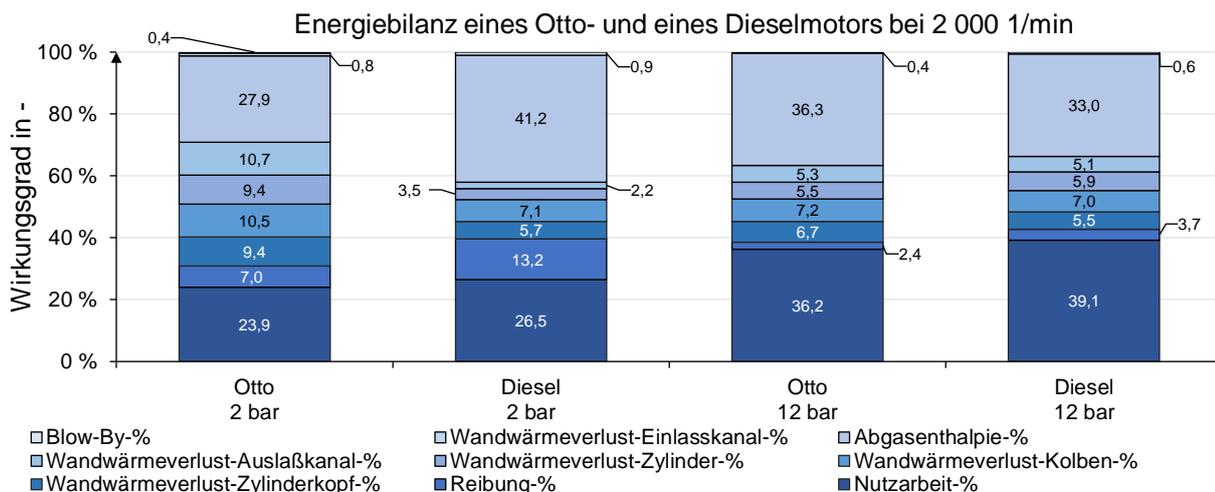


Abbildung 2-31 Energiebilanz eines Otto- und eines Dieselmotors bei 2 000 1/min bei 2 bar und bei 12 bar nach [62]

²⁹ Blow-by-Verluste: engl. Begriff. Z. Dt. Leckageverluste.

Die Abbildung 2-32 stellt eine dafür notwendige Motorkühlung beispielhaft dar. Das Thermomanagement einer Verbrennungskraftmaschine ist mit einem Kühlmittel- und mit einem Ölkreislauf, welche über eine Kühlmittel- bzw. über eine Ölpumpe angetrieben wird, aufgebaut. Die beiden Kühlmedien temperieren den Verbrennungsmotor (VM) und den Turbolader. In dem gezeigten Beispiel ist der Turbolader sowohl wasser- als auch ölgekühlt. Beide Kühlmedien sind jedoch nicht zwingend gleichzeitig erforderlich. Bei einem ersten Start des Motors ist dieser noch kalt und heizt sich erst während des Betriebs, durch die inneren Verluste, auf. Bis die Solltemperatur erreicht wird, wird das Kühlmittel, ohne eine Durchströmung eines Wärmeübertragers, in dem Kreis geführt. Sobald die Betriebstemperatur erreicht ist, regelt ein Bypass zu dem Hochtemperaturkühler die Wärmeabgabe. Ein VM wird dabei bei ca. 90 °C eingeregelt. Während das Kühlmittel primär den Zylinderblock und den Zylinderkopf kühlt, temperiert das Öl die Bauteile in dem Kurbelgehäuse und die Kolben. Über einen Öl/Wasser-Wärmeübertrager wird in diesem Fall die Wärme an das Kühlmittel und folgend an die Umwelt abgegeben. Ein direkter Öl/Luft-Wärmeübertrager kann ebenfalls verbaut sein. Wenn ein Heizbedarf für die Kabine vorhanden ist, wird nach der Motorerwärmung über ein Ventil ein Wärmestrom über einen Heizungs-Wärmeübertrager eingestellt und die Motorabwärme für die Kabinentemperierung genutzt.

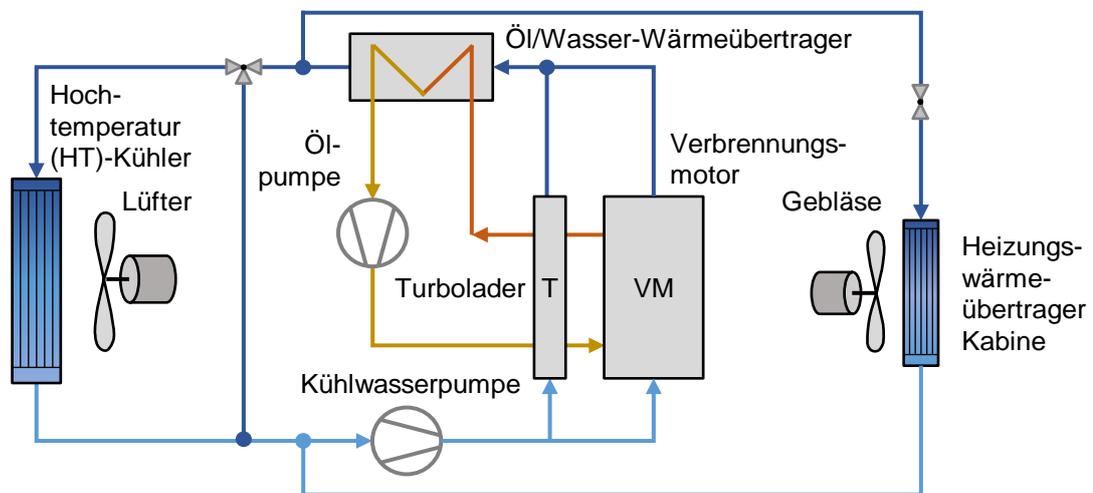


Abbildung 2-32 Beispielhafter Kühlkreislauf eines Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor

Die Abbildung 2-33 zeigt ein praktisches Beispiel für einen Ottomotor. In der Darstellung ist der 4-Zylinder-Ottomotor M282 der Firma Daimler AG visualisiert. Dieser erreicht mit 1,4 l Hubraum bis zu 120 kW [75].

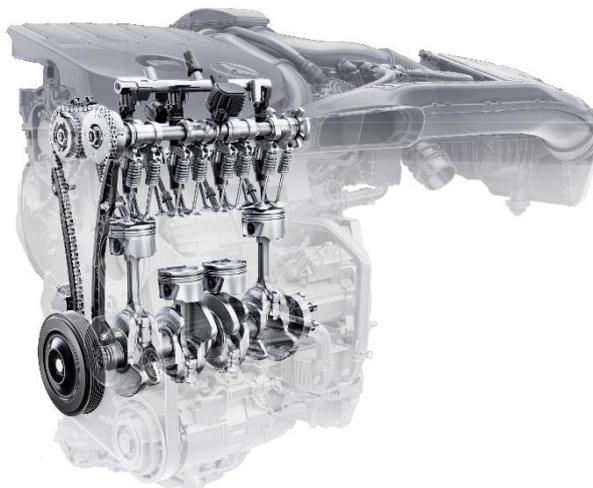


Abbildung 2-33 4-Zylinder-Ottomotor Mercedes-Benz M282 der Firma Daimler AG nach [76]

Als weiterführende Literatur zu Verbrennungsmotoren wird unter anderem [77] empfohlen.

2.5.6 Getriebe und Differenzialgetriebe

Ein Getriebe wird in einem Antriebsstrang verbaut, um die Drehzahl und das Drehmoment eines Energiewandlers, Verbrennungs- oder Elektromotor, den benötigten Größen an den Rädern anzupassen. Die Wandlung der Drehzahl und jene des Drehmoments wird in einem Getriebe durch unterschiedliche Zahnradgrößen oder Planetensätze und Kupplungen realisiert. Die Abbildung 2-34 visualisiert in a) einen theoretischen Aufbau eines Getriebes und in b) eine praktische Umsetzung eines Automatikgetriebes mit neun Übersetzungsstufen. [78]

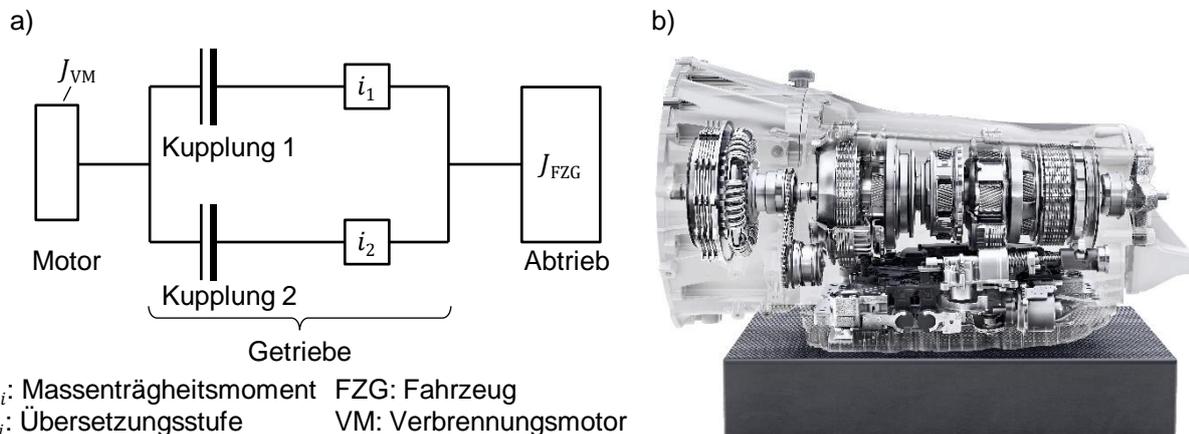


Abbildung 2-34 a) Theoretische Darstellung eines Automatikgetriebes nach [78] und b) realisiertes Automatikgetriebe Mercedes-AMG SPEEDSHIFT MCT 9G der Firma Mercedes-AMG GmbH nach [79]

Über Kupplungen werden die Übersetzungsstufen i_i zwischen die Trägheitsmomente des Verbrennungsmotors J_{VM} und jene des Antriebs J_{FZG} geschaltet. Bei einem Automatikgetriebe sind in dem Gegensatz zu einem Handschaltgetriebe mehrere Kupplungen verbaut und der Schaltvorgang erfolgt ohne Zugkraftunterbrechung. Während aktuell manuelle Getriebe in dem Pkw-Bereich meistens mit fünf oder mit sechs Gängen gebaut werden, sind Automatikgetriebe mit sieben bis neun Übersetzungsstufen ausgestattet. Das ausgehende Drehmoment eines Getriebes wird mittels eines Differenzialgetriebes auf die Räder der Antriebsachse verteilt. Ein Ausgleichsgetriebe kann eine feste, interne Übersetzung beinhalten oder nur eine Kraftverteilung auf die Räder regeln. Die Abbildung 2-35 stellt in a) den prinzipiellen Aufbau eines Differenzialgetriebes und in b) ein praktisch umgesetztes Hinterachs-Sperrdifferenzial dar.

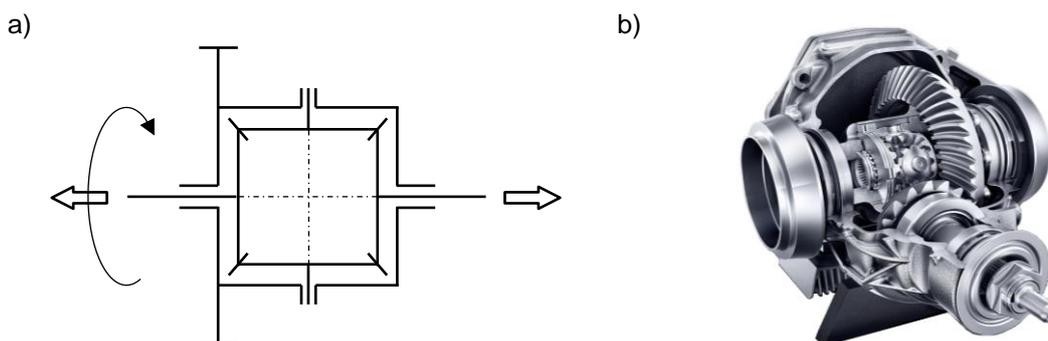


Abbildung 2-35 Theoretische Darstellung eines Differentials nach [78] und b) Hinterachs-Sperrdifferenzialgetriebe des Mercedes-AMG SLC 43 der Firma Mercedes-AMG GmbH nach [80]

Mit einer Leistungswandlung und mit einer Kraftübertragung sind Verlustleistungen verbunden. Komponenten müssen unter anderem deshalb temperiert werden. Für eine Untersuchung des Energieverbrauchs mit dem Einfluss der Nebenverbraucher wird die notwendige Leistung für das dafür erforderliche Wärmemanagement berücksichtigt. Folgend werden deshalb Grundlagen des Thermomanagements in dem Pkw-Bereich erörtert, um angewandte Lösungen und deren Leistungsaufnahme beurteilen zu können.

2.6 Thermomanagement in dem Pkw-Umfeld

Zunächst werden einige Grundbegriffe und einige Grundlagen zu dem Wärmetransport beschrieben, um das Thermomanagement in dem Pkw-Bereich zu verstehen. Dabei werden die Begriffe Energieumwandlung inkl. Wirkungsgrad und Leistungszahl, thermische Energie, Wärmekapazität, innere Energie und Enthalpie erklärt und anschließend unterschiedliche Arten des Wärmetransports erörtert. Abschließend wird auf Klimatisierungskreisläufe und dessen Komponenten und Funktionsweise eingegangen.

2.6.1 Grundbegriffe und Grundlagen zu dem Wärmetransport

Bei einer Energieumwandlung hängt ein dazugehöriger Verlust von der Art der Wandlung ab. Der uneingeschränkt in eine nutzbare Arbeit umwandelbare Anteil der Energie wird Exergie genannt. Die verbleibende, nicht nutzbare Energiemenge wird als Anergie bezeichnet. Das Verhältnis der nutzbaren zu der aufgewandten Energiemenge lautet Wirkungsgrad η . Dieser wird in Abhängigkeit der nutzbaren Leistung P_{Nutzbar} und der aufgewandten Leistung $P_{\text{Aufgewandt}}$ bzw. durch die korrespondierenden Energien E_{Nutzbar} und $E_{\text{Aufgewandt}}$ nach

$$\eta = \frac{P_{\text{Nutzbar}}}{P_{\text{Aufgewandt}}} \quad (2-13)$$

bzw. nach

$$\eta = \frac{E_{\text{Nutzbar}}}{E_{\text{Aufgewandt}}} \quad (2-14)$$

berechnet. Wird beispielsweise ein Wirkungsgrad eines elektrischen Luftheizers für die Kabinenklimatisierung berechnet, entspricht die nutzbare Leistung der bereitgestellten Wärme und die aufgewandte Leistung der elektrischen Leistungsaufnahme des Luftheizers. Der Wirkungsgrad nimmt dabei Werte kleiner als eins an. Wird in dem Gegensatz zu einem elektrischen Heizer eine Wärmepumpe oder eine Kompressionskälteanlage verwendet, wird nicht der Wirkungsgrad, sondern die Leistungszahl als Bewertungsmaßstab herangezogen. Durch eine Anpassung des Betrachtungsraums, kann die Leistungszahl, in einem Kühlfall auch Coefficient of Performance *COP* und in einem Heizfall auch Energy Efficiency Ratio *EER* genannt, in diesem Kontext Werte größer als eins erreichen. Wie in der Formel

$$EER \text{ bzw. } COP = \frac{Q_{\text{Heizen bzw. kühlen}}}{W_{\text{Aufwand}}} \quad (2-15)$$

dargestellt, wird bei der Berechnung des *EERs* bzw. des *COPs* die eingesetzte Arbeit W in das Verhältnis zu der Nutzwärme bzw. zu der Nutzkälte $Q_{\text{Heizen bzw. kühlen}}$ gesetzt. Auf die Anwendung und die physikalischen Grundlagen einer Kompressionskälteanlage wird in dem Kapitel 2.6.3 näher eingegangen.

Wird ein Objekt erwärmt, erhöht sich seine thermische Energie E_{Th} in Abhängigkeit des Wärmeeintrags. Mit dem Zusammenhang

$$E_{\text{Th}} = C \cdot m \cdot T \quad (2-16)$$

wird diese berechnet. Die thermische Energie setzt sich aus dem Produkt der Wärmekapazität C , der Masse m und der Temperatur T zusammen. Hierbei stellt C ein Maß für die materialabhängige Speicherkapazität an thermischer Energie eines Körpers dar. Wenn die Wärmekapazität bei einem konstanten Druck betrachtet wird, wird diese C_p und bei einem konstanten Volumen C_v genannt. In der Praxis wird die Wärmekapazität auf eine Masse von einem Kilogramm bezogen und als spezifische Wärmekapazität c gekennzeichnet. Diese beschreibt die notwendige Wärmemenge um eine Masse von 1 kg um 1 K zu erwärmen und folgt mit

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2-17)$$

Mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, dem Gesetz der Energieerhaltung, lässt sich die innere Energie U eines Systems berechnen. Die Differenz der inneren Energie wird dabei nach

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (2-18)$$

berechnet, wobei δQ die dem System zugeführte Wärme und δW die an dem System verrichtete Arbeit darstellt. Wenn der inneren Energie das Produkt aus Druck p und aus Volumen V addiert wird, wird die Enthalpie H über

$$H = U + pV \quad (2-19)$$

ermittelt. Mithilfe der Enthalpie und einem bekannten Massenstrom wird beispielsweise die notwendige Energiemenge für das Trocknen der Luft für die Klimatisierung der Fahrgastzelle bestimmt.

Eine für die Temperierung der Fahrgastzelle oder der Komponenten notwendige Wärmeübertragung erfolgt grundsätzlich durch eine Wärmeleitung, durch eine Wärmekonvektion oder durch eine Wärmestrahlung. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik strömt die Wärme dabei stets von einer höheren zu einer niedrigeren Temperatur.

Bei einer **Wärmeleitung** wird ein konduktiver Wärmefluss zwischen zwei Körpern betrachtet. Dieser ist durch eine Temperaturdifferenz getrieben und berücksichtigt keine Materialbewegung. Die Wärme wird dabei durch molekulare Kollisionen transportiert. Der resultierende Wärmestrom $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ bzw. $\frac{dQ}{dt}$ wird über

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{l} \text{ bzw. } \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2-20)$$

berechnet. Dabei ist λ die Wärmeleitfähigkeit, A die Querschnittsfläche, T_1 und T_2 die betrachteten Temperaturen und l die Distanz. Die Wärmeleitfähigkeit ist materialspezifisch, druck-, temperatur- und, bei anisotropen Materialien, auch richtungsabhängig. Materialien mit hohen Wärmeleitkoeffizienten, wie beispielsweise Metalle, sind gute Wärmeleiter und Materialien mit niedrigen Werten, wie beispielsweise Luft, sind Wärmeisolatoren. Da in vielen Anwendungen λ oder A nicht konstant ist, muss die Wärmeleitung distanz aufgelöst betrachtet werden. Dazu werden eine infinitesimale Länge dx und dessen Temperaturgradient dT für die Berechnung der Wärmeleitung herangezogen.

Flüssigkeiten und Gase sind in dem Vergleich zu festen Materialien keine guten Wärmeleiter. Diese können die Wärme jedoch durch **Konvektion** transportieren. Bei einer Konvektion findet in dem Gegensatz zu einer Wärmeleitung ein Materialtransport statt. Bei einem massengebundenen Wärmeübertragungsmechanismus wird Enthalpie durch Teilchenbewegung transportiert. Die Konvektion wird dabei in eine freie, durch Dichteunterschiede bedingte, oder in eine erzwungene Konvektion, durch äußere Kräfte erzeugte Medienströmung, eingeteilt. Mit

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_{\text{Medium}} - T_{\text{Körper}}) \quad (2-21)$$

wird ein Wärmestrom durch eine Konvektion berechnet. Der Wärmeübergangskoeffizient α , die Oberfläche A und die Temperatur des Mediums bzw. jene des Körpers T_{Medium} bzw. $T_{\text{Körper}}$ werden dabei verrechnet. Der Wärmeübergangskoeffizient ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und der Strömungsart, den geometrischen Verhältnissen und der Oberflächenbeschaffenheit. Für spezifische Berechnungsmöglichkeiten des Wärmeübergangskoeffizienten wird [81] empfohlen. Je höher die Temperaturdifferenz, die Fläche oder der Wärmeübergangskoeffizient ist, desto höher ist der resultierende Wärmestrom.

Die **Wärmestrahlung** beschreibt eine elektromagnetische Strahlung, welche von jedem Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt ausgeht. Für diese Art des Wärmetransports ist keine Materie notwendig. Die Wärmestrahlung zwischen zwei Körpern wird über

$$\dot{Q} = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-22)$$

bestimmt. Dabei ist e der Emissionsgrad, σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, A die Oberfläche und T_1 und T_2 die Temperaturen der Körper. Der Emissionsgrad nimmt Werte zwischen null und eins an und ist in dem gleichen Maß ein Wert für die Absorption. Helle und glänzende Körper besitzen niedrige Emissionsgrade, wobei schwarze Flächen hohen Wert aufweisen. Die Stefan-Boltzmann-Konstante ist eine universelle Konstante und besitzt den Wert $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Sowohl die Differenz der jeweils vierten Potenz der Temperaturen der beiden Körper als auch der Emissionsgrad, die Stefan-Boltzmann-Konstante und die Fläche gehen proportional in die Berechnung der Wärmestrahlung ein.

Bei der Klimatisierung eines Pkws finden alle drei Mechanismen der Wärmeübertragung statt. Da aufgrund unterschiedlicher Verlustleistungen und unterschiedlicher Wärmebedarfe eine Verteilung bzw. ein Wärmemanagement notwendig ist, kommen verschiedener Klimatisierungskreisläufe zu dem Einsatz. Das Thermomanagement eines Fahrzeugs wird in dem nachfolgenden Unterpunkt näher beschrieben.

2.6.2 Klimatisierungskreislauf Pkw

Bei einer Klimatisierung in einem Pkw werden sowohl die einzelnen Komponenten des Antriebsstrangs als auch die Fahrzeugkabine temperiert. Bei Erstgenannten ist das Thermomanagement verantwortlich, eine sichere und lebensdauerförderliche Betriebstemperatur zu regeln, während bei der Klimatisierung der Kabine die Sicherheit und das Wohlbefinden der Insassen gewährleistet werden muss. Die Abbildung 2-36 zeigt die verschiedenen Thermomanagementkreisläufe anhand eines Plug-In-Fahrzeugs auf.

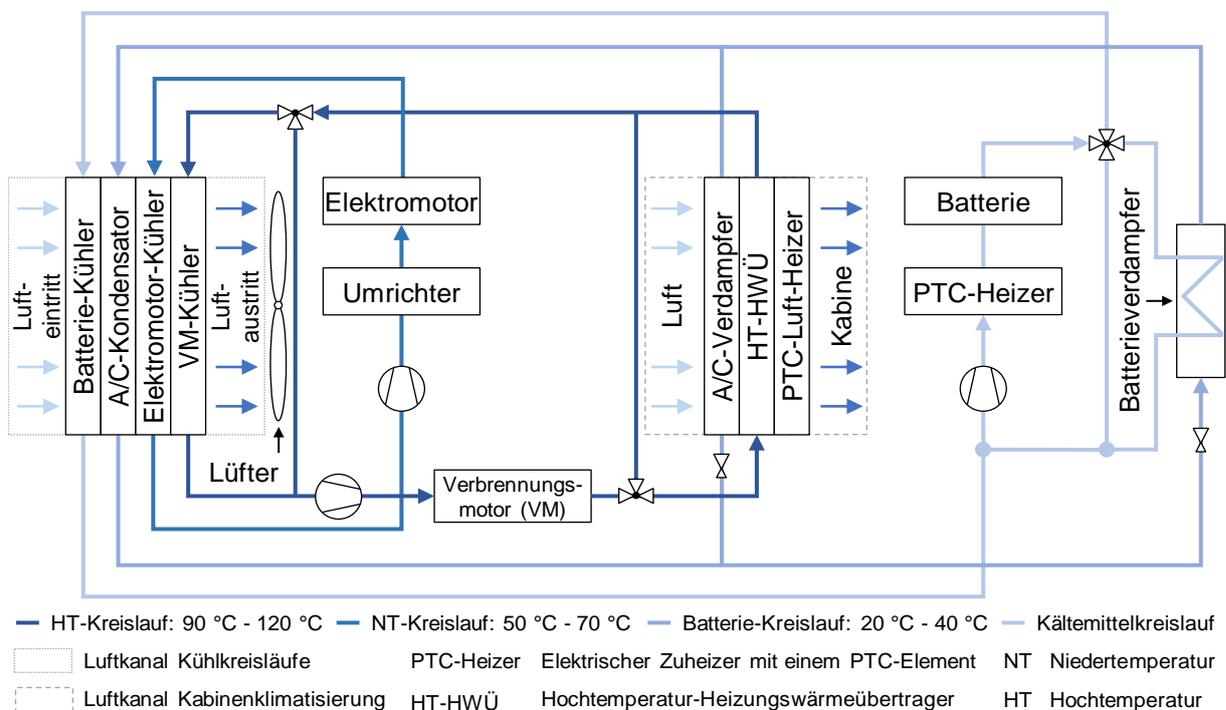


Abbildung 2-36 Beispielhafter Aufbau eines Kühlkreislaufs eines Plug-In-Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor nach [82]

Der Luftkanal der Kühlkreisläufe ist mit einem grau gepunkteten Rahmen versehen. Dabei sind die einzelnen Kühler mit der Temperatur aufsteigend angeordnet, um einen möglichst großen Temperaturun-

terschied und somit einen hohen Wärmestrom zu dem jeweiligen Kühler zu gewährleisten. Die Reihenfolge Batteriekühler, Klimaanlagekondensator, Elektromotor- und Verbrennungs- bzw. Brennstoffzellensystemkühler resultiert aus dieser Anordnung. Nach dem letzten Kühler ist ein Lüfter verbaut, um immer einen ausreichenden Luftmassenstrom zur Verfügung zu stellen. Dieser gewährleistet bei einem Fahrzeugstillstand oder bei niedrigen Geschwindigkeiten, mit einem unzureichenden Luftmassenstrom, eine ausreichende Durchströmung. Die Fahrzeuggabine wird über ein separates Klimamodul mit Luft versorgt. In der Abbildung 2-36 ist dieses grau gestrichelt und in der Abbildung 2-37 ist dieses in dem Detail dargestellt. [83]

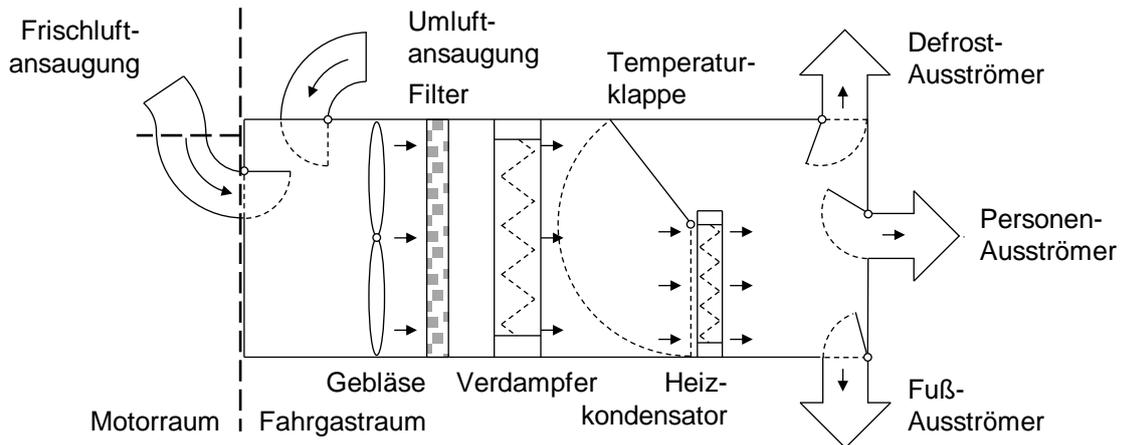


Abbildung 2-37 Schematische Darstellung des Klimageräts und des Luftpfads nach [83]

Über eine Ansaugung der Frisch- oder der Umluft wird mittels eines Gebläses ein Luftstrom in den Klimakanal gesaugt. Dieser wird zunächst gefiltert und durchströmt darauffolgend einen Verdampfer. Anschließend wird die Strömung durch einen Heizkondensator oder dessen Bypass zu der Scheibe (Defrost-Ausströmer), zu den Insassen (Personen-Ausströmer) oder zu den Füßen (Fuß-Ausströmer) geleitet. Die Klimatisierung einer Kabine ist von einer Vielzahl von physikalischen Einflussfaktoren betroffen. Die Abbildung 2-38 zeigt, dass sowohl die Sonneneinstrahlung, der Strahlungshintergrund, die Wind- und die Fahrgeschwindigkeit, die Umgebungstemperatur und die Umgebungfeuchtigkeit, die Körperstrahlung, die Fahrzeuggeometrie, die thermischen Massen, die Insassen und die Belüftung als auch die implizierten Größen, wie beispielsweise die Transmission, die Wärmeleitung und die Wärmestrahlung, einen Einfluss auf die Kabinenklimatisierung besitzen. [84]

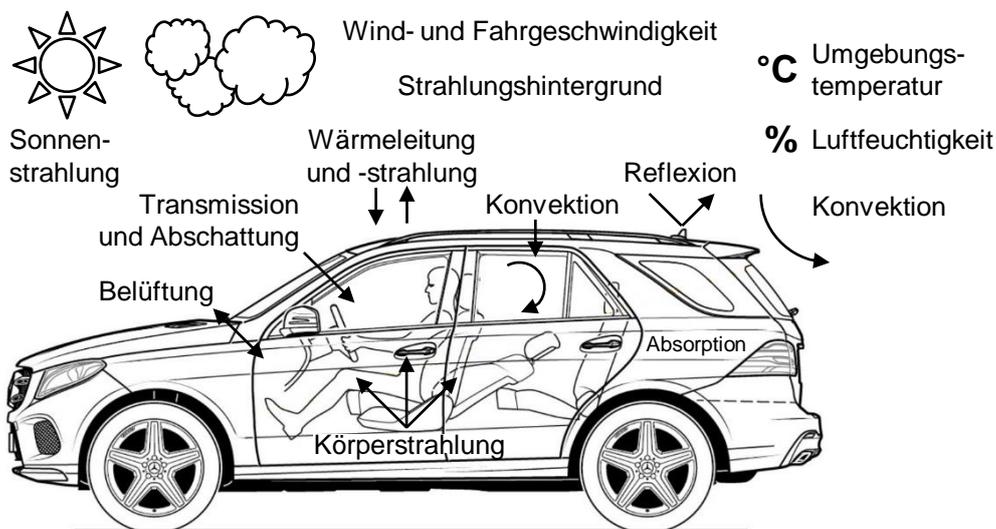


Abbildung 2-38 Physikalische Einflussfaktoren auf die Kabinenklimatisierung nach [84], Bild von [32]

Mit dem Ziel den verschiedenen Bedingungen gerecht zu werden, werden an die Kabinenklimatisierung unterschiedliche funktionale Anforderungen gestellt. Die Klimatisierung der Fahrgastzelle wird in die drei Bedarfsfälle Heizen, Entfeuchten und Kühlen eingeteilt. Die Abbildung 2-39 visualisiert die Aufteilung der funktionalen Anforderungen, zeigt Funktionseinschränkungen auf und stellt die angewandten Betriebsmodi dar. Für das Erwärmen der Fahrgastzelle können unterschiedliche Wärmequellen genutzt werden. Wird die Abwärme von Komponenten, wie beispielsweise jene des Verbrennungsmotors oder jene des Brennstoffzellensystems, verwendet, ergibt sich kein zusätzlicher Energieaufwand für die funktionale Anforderung Heizen. Steht die Wärme in einem Bedarfsfall noch nicht zu der Verfügung, oder ist keine nutzbare Abwärme der Komponenten vorhanden, muss die Kabine, um den Komfort und die Sicherheit zu gewährleisten, anderweitig erwärmt werden. Elektrische oder fossile Zuheizler, Wärmepumpen oder Wärmespeicher werden dafür eingesetzt. Während elektrische Zuheizler auch bei sehr kalten Temperaturen verwendet werden können, ist der Temperaturbereich von Wärmepumpen, welche die Umgebungsluft als Wärmequelle nutzen, aufgrund eines notwendigen Abtauens des Außenwärmeübertragers limitiert. In dem zweiten Fall, der Entfeuchtung, muss die der Kabine zugeführte Luft aufgrund einer Gefahr eines Beschlagens der Scheiben zunächst abgekühlt, entfeuchtet und anschließend wieder aufgewärmt werden. Für beide Vorgänge muss Energie aufgewandt werden. Eine Entfeuchtung ist deshalb energieintensiv. Soll die Temperatur einer Fahrgastzelle aktiv reduziert werden, wird eine Klimaanlage verwendet. Diese nutzt einen Kältemittelkreisprozess aus, um die Komforttemperatur energieeffizient zu erreichen, vgl. dazu Kapitel 2.6.3. [85]

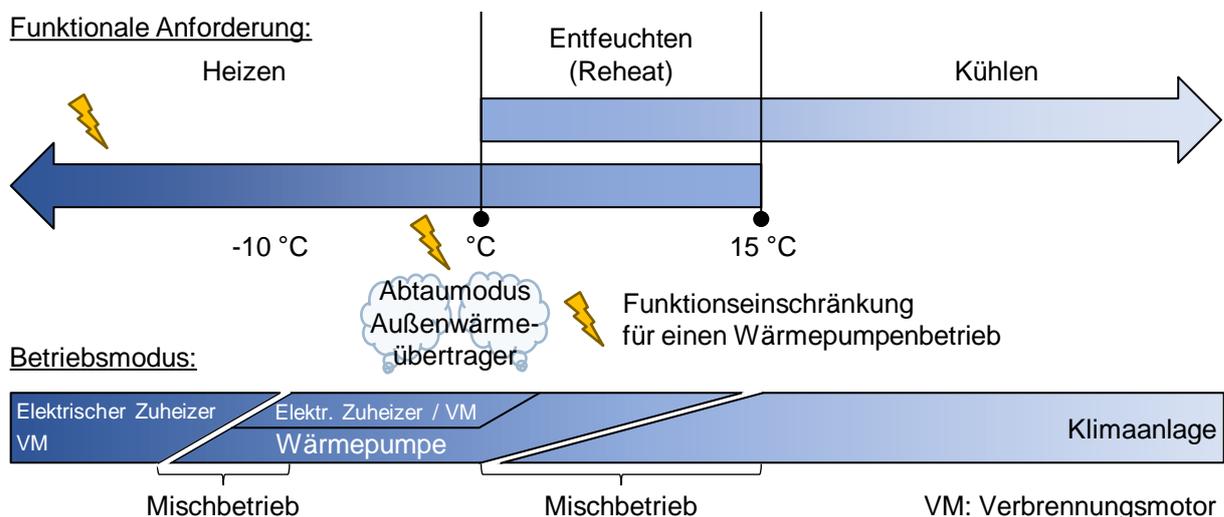


Abbildung 2-39 Beispielhafte Darstellung der funktionalen Anforderung und der Betriebsmodi einer Klimatisierung einer Fahrgastzelle nach [85]

2.6.3 Kältemittelkreisprozess

Für ein aktives Abkühlen der Fahrgastzelle ist unter anderem ein Kältemittelkreisprozess notwendig. Die Abbildung 2-40 a) stellt einen dafür eingesetzten, prinzipiellen Aufbau mit den Komponenten Verdichter, Verflüssiger, Drosselorgan und Verdampfer dar. Mittels der verbauten Komponenten wird der Kältemittelkreisprozess realisiert. Die Abbildung 2-40 b) zeigt den dabei realisierten, theoretischen, linkläufigen Prozess in einem p-H-Diagramm. Zwischen dem Punkt 1 und dem Punkt 2 wird zunächst ein überhitzter Dampf mit einem niedrigen Druck isentrop auf ein hohes Druckniveau mittels des Verdichters verdichtet. Dabei erwärmt sich das Gas bis zu dem Punkt 2. Anschließend wird das Gas über einen Verflüssiger geleitet, dabei kondensiert und ggf. bis zu dem Punkt 3 unterkühlt. Die Verflüssigung erfolgt bei einem konstanten Druck, was in einem Zwei-Phasengebiet einer gleichbleibenden Temperatur entspricht. Dieser Prozessschritt erfolgt in dem Verflüssiger. Das Kältemittel ist nach der dabei durchgeführten Kondensation wieder komplett flüssig (Unterkühlung). Anschließend wird die Flüssigkeit über ein Drosselorgan isenthalp entspannt, sodass dieses als Flüssigkeits-Gas-Mischung mit einer niedrigen Temperatur und einem niedrigen Druck in dem Punkt 4 vorliegt. Über einen Verdampfer nimmt das

Zwei-Phasen-Gemisch abschließend Wärme auf einer niedrigen Temperatur auf und verdampft. Der Ausgangszustand, Punkt 1, wird wieder erreicht und der Prozess beginnt von Neuem. [86]

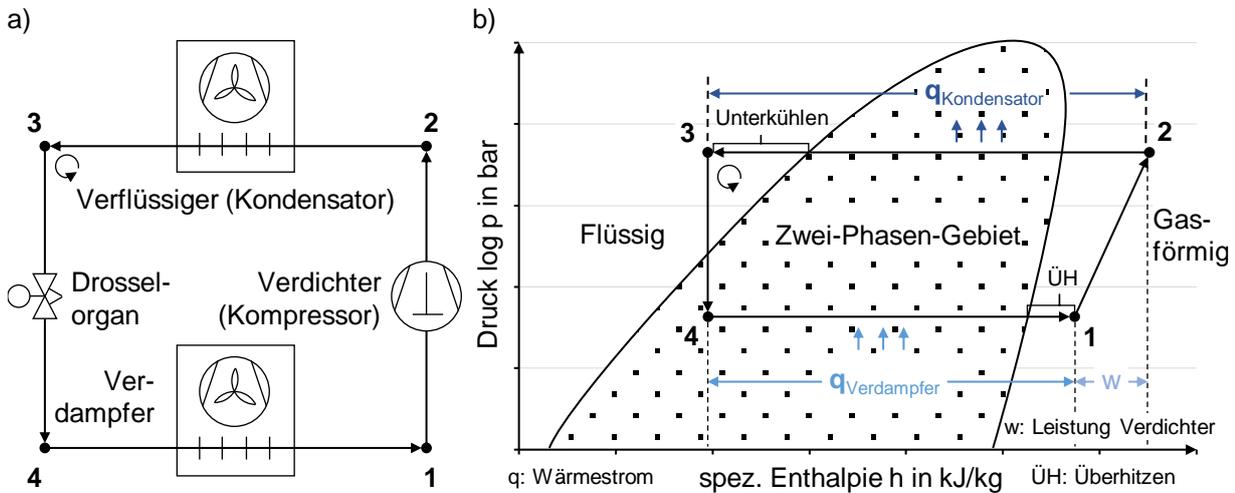


Abbildung 2-40 Beispielhafte Darstellung a) der Komponenten eines Kältemittelkreisprozesses nach [86] und b) eines Kältemittelkreisprozesses in einem p-h-Diagramm nach [86]

Die während des Kreisprozesses benötigte Verdampfungsenthalpie wird dem durch den Verdampfer strömenden Medium entzogen und dieses dabei aktiv gekühlt. Würde bei dem Abkühlvorgang die relative Feuchtigkeit des Mediums theoretisch 100 % übersteigen, wird Wasser auskondensiert und das Medium entfeuchtet. Analog dazu wird dem, durch den Verflüssiger geleiteten, Medienstrom Wärme zugeführt. Mittels der Gleichung 2-15 auf der Seite 39 wird die Leistungszahl eines theoretischen Kreisprozesses berechnet. Aus der Formel geht hervor, dass diese sowohl für den Kälte- als auch für den Wärmepumpenbetrieb Werte größer als eins annehmen kann. Dies ist möglich, da für die Wärmezufuhr in das Kältemittel Energie aus jenem, den Verdampfer durchströmenden, Medium natürlich³⁰ entzogen und bei der Wärmeabgabe aus dem Kältemittel Energie jenem, den Kondensator durchströmenden, Medium natürlich abgegeben wird. Durch eine praktische Umsetzung eines Kreisprozesses ergeben sich Abweichungen von dem beschriebenen, idealen Prozess. Unter anderem findet die durchgeführte Kompression nicht isentrop statt und Reibungsverluste treten auf. Aufgrund Letzteren muss dem Kältemittel Kältemittelöl, als Schmiermittel für den Kompressor, zugegeben werden. Dies reduziert den maximalen Wärmetransport und somit den Wirkungsgrad [87]. Für eine realitätsnahe Abbildung der Effizienz des Kältemittelkreislaufs wird, in dieser Arbeit, vereinfacht ein Gütegrad³¹ verwendet. Dieser wird genutzt, da eine Simulation eines Zwei-Phasen-Gebiets rechenintensiv ist und in dem Umfang der Arbeit nicht abgebildet werden kann. Der eingesetzte Gütegrad bildet somit das Verhältnis der realen zu der theoretischen Leistungszahl wider und wird folglich Werte zwischen null und eins annehmen. [86]

Die Abbildung 2-41 zeigt einen praktischen Aufbau eines in einem Pkw verbauten Kältemittelaggregats. In der Darstellung sind die unterschiedlichen Druckniveaus farblich abgehobenen visualisiert. Die jeweiligen Zustände des Kältemittels während des Prozesses sind ebenfalls zu sehen. Die Hochdruckseite ist in Hell- und in Dunkelblau und die Niederdruckseite in Hell- und in Dunkelgrün dargestellt. In dem hellblauen und in dem hellgrünen Bereich ist das Kältemittel gasförmig, während in dem dunkelblauen und in dem dunkelgrünen Abschnitt dieses flüssig ist. Des Weiteren ist mit Pfeilen die Richtung des Medienstroms gekennzeichnet. Zusätzlich ist der Luftstrom durch den Luftkanal des Motorraums und jener durch den Luftkanal der Fahrgastzelle in der Abbildung visualisiert. Ein warmer Luftstrom ist als oranger Pfeil und ein kalter Luftstrom als gelber Pfeil eingezeichnet. Neben den Druckniveaus, den

³⁰ Basierend auf dem Temperaturunterschied der beiden Medien und ohne Einsatz zusätzlicher Energie wird Wärme übertragen.

³¹ Gütegrad: Ein Gütegrad bildet das Verhältnis eines Realprozesses zu einem theoretischen Idealprozess ab.

Zuständen, der Strömungsrichtung und des Luftstroms sind zudem die einzelnen Komponenten mit Ziffern markiert. Die Punkte 1 und 2 markieren den Kompressor und die, in diesem Fall verwendete, Kupplung desselben. Je nachdem ob der Kompressor elektrisch oder mechanisch angetrieben wird, ist eine Kupplung notwendig. Neuere Kältemittelkompressoren werden aus Gründen der Effizienz elektrisch betrieben. In dem Punkt 3 ist der Kondensator zu sehen. In der Darstellung wird dieser mit Luft aus dem Luftkanal in dem Motorraum durchströmt. Ein Lüfter, Punkt 4, regelt eine Luftströmung durch diesen und bestimmt damit die Wärmeabfuhr. In dem Punkt 5 ist ein Filter-Trockner, welcher das Kältemittel filtert und trocknet, und in dem Punkt 6 der Verdampfer, welcher die Kabinenluft abkühlt, markiert. Ein Gebläse, Punkt 7, regelt die Luftströmung durch den Verdampfer und bestimmt zusammen mit dem Kompressor und mit dem Lüfter die Wärmeaufnahme bzw. die Kühlung der Luft. Nach dem Verdampfer durchläuft das Kältemittel ein Expansionsventil, Punkt 8, und strömt komplett gasförmig in den Kompressor zurück.

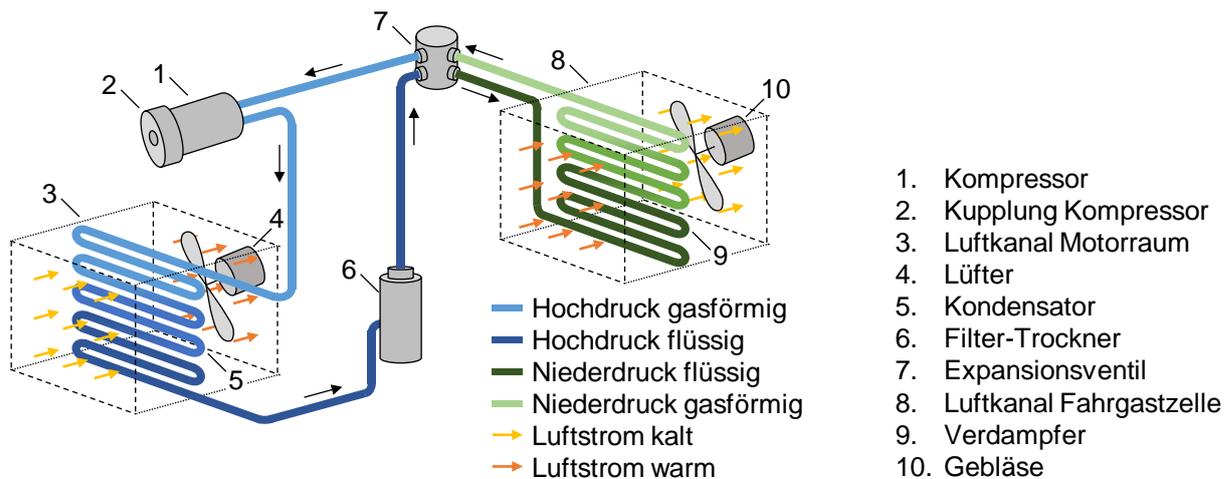


Abbildung 2-41 Beispielhafter Aufbau eines Kältemittelaggregats in einem Pkw nach [88]

2.6.4 Wärmepumpensystem und elektrische Zuheizter

Müssen die Kabinenluft bzw. die Komponenten von einem niedrigen Temperaturniveau auf deren Wohlfühl- bzw. auf die optimale Betriebstemperatur gebracht werden, wird unter anderem ein Wärmepumpensystem oder ein elektrischer Zuheizter verwendet.

Bei einem Wärmepumpensystem wird die Kondensationsenthalpie eines Kältemittelkreislaufs, siehe Abbildung 2-40 b) auf der Seite 44, ausgenutzt und beispielsweise der Temperierung der Fahrgastzelle zu der Verfügung gestellt. Das Kältemittel nimmt durch das Verdampfen Wärme aus einem, den Verdampfer durchströmenden, Medium auf einem niedrigen Temperaturniveau auf und gibt diese inkl. der Verdichtungswärme an ein, den Kondensator durchströmendes, Medium ab. Die Leistungszahl einer Wärmepumpe kann durch das Ausnutzen der Verdampfungsenthalpie deutlich über eins liegen. Speziell bei Luft-Luft-Wärmepumpen, bei welchen sowohl der Verdampfer als auch der Kondensator mit Luft durchströmt werden, ist darauf zu achten, dass die Verdampfungstemperatur ausreichend hoch über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt, da ansonsten Luftfeuchtigkeit an dem Verdampfer gefriert [89]. Eine resultierende Eisbildung an dem Verdampfer würde die Leistungszahl der Wärmepumpe und den Luftstrom zu den anderen Wärmeübertragern in dem Kühlmodul stark reduzieren und müsste deshalb über einen zusätzlichen Energieaufwand, für die Erwärmung des Verdampfers, abgetaut werden. Neben Luft-Luft-Wärmepumpen sind unter anderem auch Wasser/Sole-Wasser/Sole- oder Luft-Wasser/Sole-Wärmepumpen möglich. Da eine Wärmeabgabe bei Wärmepumpen bei einer unkritischen Verdampfungstemperatur zu der Verfügung gestellt werden muss, können diese nicht über den gesamten, für die Fahrzeugtemperierung relevanten, Temperaturbereich eingesetzt bzw. erst ab dem Erreichen der notwendigen Verdampfungstemperatur verwendet werden. Des Weiteren ist der Einsatz von Wärmepumpensystemen auch aus Kostensicht zu betrachten, da diese teurer als elektrische Zuheizter sind.

Elektrische Zuheizer werden unter anderem eingesetzt, um Bereiche ohne möglichen Wärmepumpeneinsatz abzudecken. Diese verwenden Widerstände mit einem positiven Temperaturkoeffizienten und werden deshalb auch PTC-Heizer genannt. Elektrische Heizer wandeln die eingesetzte, elektrische Leistung nahezu zu 100 % in Wärme um und erreichen maximal einen Wirkungsgrad von eins. Die Abbildung 2-42 a) stellt einen elektrischen Luftheizer, welcher meist mit 12 V oder mit 48 V versorgt wird, dar und die Abbildung 2-42 b) zeigt einen elektrischen Wasserheizer. Dieser wird üblicherweise mit Hochvolt betrieben und findet bei erhöht elektrifizierten Antriebssträngen Anwendung. Während Luftheizer aufgrund einer niedrigen Spannung durch einen maximalen Strom begrenzt sind und deshalb einen Leistungsbereich zwischen ca. 400 W und ca. 2 500 W realisieren, setzen Hochvolt-Wasserheizer problemlos Leistung von ca. 7 000 W um [90].

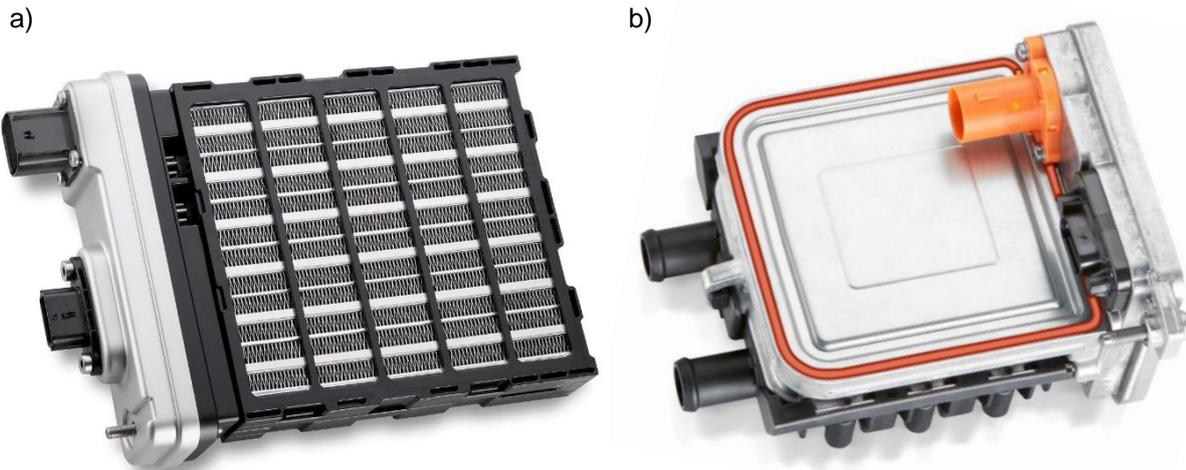


Abbildung 2-42 Abbildung eines a) elektrischen Luft- und b) eines elektrischen Wasserheizers [91]

2.7 Verwendete Software für die Gesamtfahrzeugsimulation

Für den Aufbau der Fahrzeugmodelle und für die Simulation dieser wird die Software GT-SUITE [92] von der Firma Gamma Technologies Ltd. verwendet. Bei dem eingesetzten Programm handelt es sich um eine multi-physikalische CAE³²-System-Simulations-Software. Mit der Software GT-SUITE wird in einem Programm die Längsdynamik, das mechanische, das elektrische und das thermische Verhalten der Antriebskomponenten, die Betriebsstrategien und das Thermomanagement der Fahrgastzellen simuliert. Durch einen multi-physikalischen Aufbau wird somit keine Co-Simulation³³ benötigt, was sich positiv auf die Rechenzeit auswirkt. Eine Reduzierung der Rechenzeit ist insbesondere in dem Rahmen einer Gesamtfahrzeugsimulation und besonders bei dem bearbeiteten, großen Umfang der Arbeit von Vorteil.

³² CAE: engl. computer aided engineering, z. Dt. computerunterstützte Entwicklung.

³³ Co-Simulation bezeichnet eine Simulation bei jener eine Vielzahl an Programmen verwendet wird um ein Problem zu lösen. Beispielsweise könnte die Längsdynamik in einem anderen Programm als das Thermomanagement eines Fahrzeugs simuliert werden.

3 Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs

Die folgend beschriebene Methodik wird entwickelt, um die Forschungslücke einer vergleichenden Betrachtung des realitätsnahen Energieverbrauchs verschiedener Antriebsvarianten zu schließen. Die Vorgehensweise wurde bereits in Teilen in der Literatur durch Hollweck [20], [70], [93]–[95] vorgestellt und auf verschiedene Antriebe angewandt. Die Abbildung 3-1 auf der Seite 49 stellt die verwendete Methodik dar. Diese wird folgend in dem Punkt 3.1 „Systematik für eine Ermittlung eines realitätsnahen Energiebedarfs“ beschrieben. Die gesamtheitliche Analyse des Energiebedarfs berücksichtigt die Eingangsgrößen „Nutzer-/Flottenverhalten und Fahrprofil“, „Referenzfahrzeugbildung 2015 und Referenzfahrzeugbildung 2025“ und „Wetter- und Startbedingungen“. Die Kriterien fließen in ein modular aufgebautes, gesamtheitliches Simulationsmodell ein und werden dort für eine Energiesystemanalyse herangezogen. Die verwendete Simulationsumgebung bzw. das Gesamtfahrzeugmodell wird in dem Unterpunkt „Modularer Simulationsaufbau“ generell beschrieben. Spezifischere Angaben der Modellierung der Antriebsstränge befinden sich in dem 5. Kapitel „Aufbau und Beschreibung der Antriebsvarianten“. Nach der Beschreibung des modularen Simulationsaufbaus werden die Unterpunkte „Prognose der Fahrleistungs- und der Fahrwiderstandsentwicklung“, „Prognose der Komponentenmassen und der Komponentenentwicklung“ und „Vorgehen für die Auslegung der Antriebe für das Prognosejahr 2025“ in dem Detail erläutert. Diese Unterpunkte sind Eingangsgrößen für die Referenzfahrzeugbildung, Abschnitt 3.1.2, und werden aufgrund ihres Umfangs separat beschrieben.

3.1 Systematik für eine Ermittlung eines realitätsnahen Energiebedarfs

Für eine adäquate Beantwortung der in dem 1. Kapitel erarbeiteten Forschungsfragen (FF) muss mit der anzuwendenden Methodik der Energiebedarf antriebs-, segment- und betrachtungsjahrspezifisch in Abhängigkeit des Fahrzyklus (1. FF), der europäischen Region und Jahreszeit (2. FF), extremer Wetterbedingungen (3. FF), des Nutzer- und des Flottenverhaltens (4. FF) und des Betrachtungsjahrs (5. FF) analysiert werden können. Für jede Antriebsvariante wird dafür ein Fahrzeugmodell aufgebaut. Diese bestehen aus den Submodellen „Fahrzeugarchitektur“, „Antriebsstrang mechanisch und elektrisch“, „Antriebsstrang thermisch“ und „Fahrgastzelle thermisch“. Sowohl zwischen den Untermodellen als auch zu der Umgebung werden in der Modellierung Wechselwirkungen berücksichtigt. Für das Lösen der 1. FF werden jeweils drei Referenzfahrzeuge für das Betrachtungsjahr 2015 und für das Prognosejahr 2025 erarbeitet und die Fahrzyklen NEFZ/WLTC, Artemis Innerorts, Artemis Außerorts und Artemis Autobahn berücksichtigt. Die Referenzfahrzeugbildung der Antriebsvarianten des Betrachtungsjahrs 2015 wird dabei sowohl über eine umfangreiche Analyse der Fahrzeugeigenschaften des europäischen Fahrzeugmarkts des Betrachtungsjahrs 2015 als auch über ein iteratives Auslegungstool herausgearbeitet. Dabei werden drei, den europäischen Markt widerspiegelnde, Segmentklassen klein, mittel und groß über die Anteile der Verkaufszahlen gebildet, um den Fahrzeugmarkt und die Fahrzeugeigenschaften verschiedener Fahrzeugklassen adäquat abzubilden. Für die Auslegung der Referenzfahrzeuge des Prognosejahrs 2025 wird eine Entwicklung des europäischen Fahrzeugmarkts angenommen und eine Komponenten- und eine Fahrzeugeigenschaftsentwicklung hergeleitet. Anschließend werden antriebspezifische Derivate unter Berücksichtigung der ermittelten Entwicklungen mittels des bereits erarbeiteten, iterativen Auslegungstools bestimmt. Zusammen mit den, in dem Kapitel 2.2 beschriebenen, Fahrzyklen wird die 1. FF beantwortet. Für die Lösung der 2. FF wird der Einfluss der Nebenverbraucher für europäische Regionen und für verschiedene Jahreszeiten analysiert. Diesbezüglich werden sowohl Start- als auch Wetterbedingungen herausgearbeitet und Fahrten mit den Fahrprofilen Artemis Innerorts, Artemis Außerorts und Artemis Autobahn simuliert. Fünf Startzeiten, welche Fahrten an dem Morgen, an dem Vormittag, an dem Mittag, an dem Nachmittag und an dem Abend widerspiegeln und fünf Wetterprofile je Jahreszeit werden erarbeitet und analysiert. Über die Wetterprofile, welche einen Temperaturverlauf, einen Sonnenstrahlungsverlauf, einen Luftfeuchtigkeitsverlauf und einen Druckverlauf beinhalten, werden die Startbedingungen der Fahrten eruiert und die Zustände sowohl bei einem Start als auch während einer Fahrt definiert. Mit dem Nutzen verschiedene europäi-

sche Regionen und Klimaeinflüsse abzubilden, werden die Länder Spanien, Deutschland und Norwegen untersucht. Damit wird ein warmes, ein mittleres und ein kaltes europäisches Klima berücksichtigt und die 2. FF beantwortet. Für eine Analyse extremer Wetterbedingungen (3. FF) werden zusätzlich die kältesten 1-%-Winter- und die wärmsten 1-%-Sommerbedingungen des deutschen Klimas herangezogen, dessen Einfluss untersucht und die 3. FF gelöst. Sollen reale Energiebedarfe verschiedener Nutzerprofile oder Flotten betrachtet werden (4. FF), wird dies durch die geschaffene Datenbasis der verschiedenen Startzeiten, Fahrprofile und Wetterbedingungen erreicht. Durch die angewandte Methodik wird lediglich eine Gewichtung über der Fahrleistung der verschiedenen Fahrtenverbräuche durchgeführt und die 4. FF beantwortet. Mit dem Ziel den Einfluss des Prognosejahrs 2025 (5. FF) zu bewerten, werden die Antriebsvarianten BEV und FCEV für das Segment mittel weiterentwickelt und der Energiebedarf in Abhängigkeit der Zyklen, des deutschen Wetters und des Nutzer- und des Flottenverhaltens analysiert. Die letzte FF wird damit ebenfalls gelöst. In den folgenden Unterpunkten wird die vereinfacht zusammengefasste Methodik detailliert beschrieben.

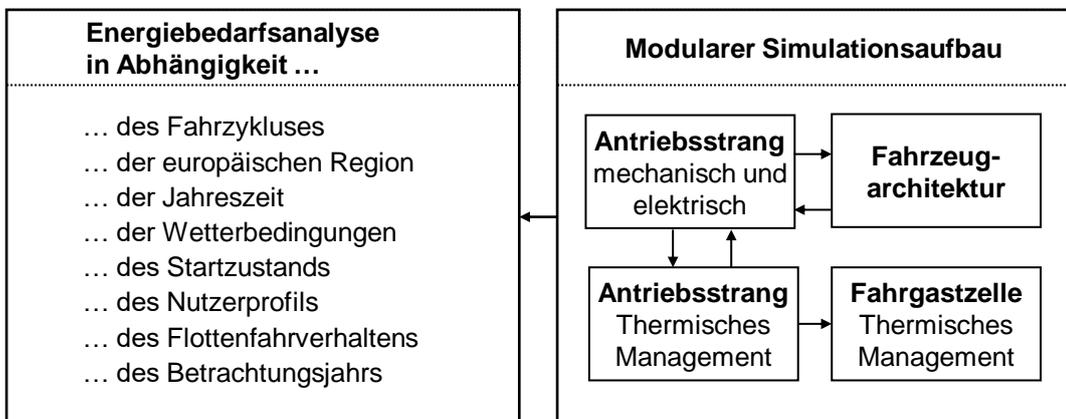
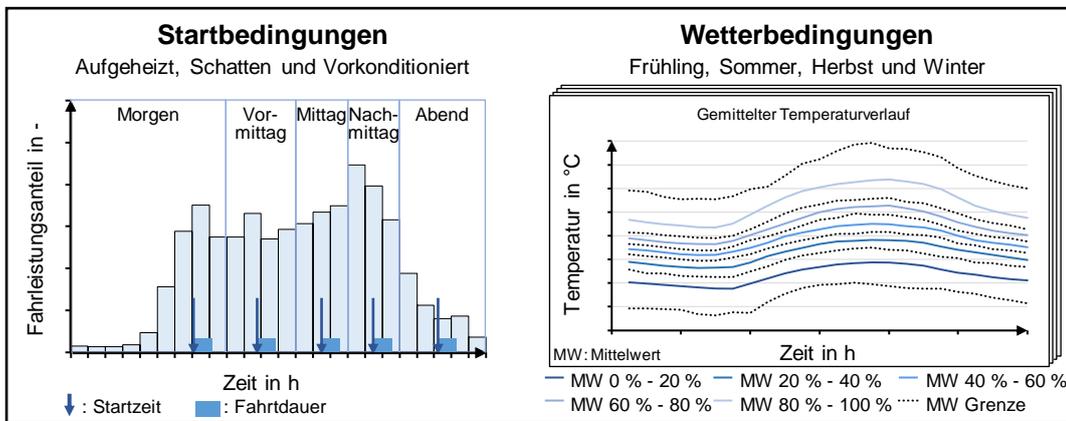
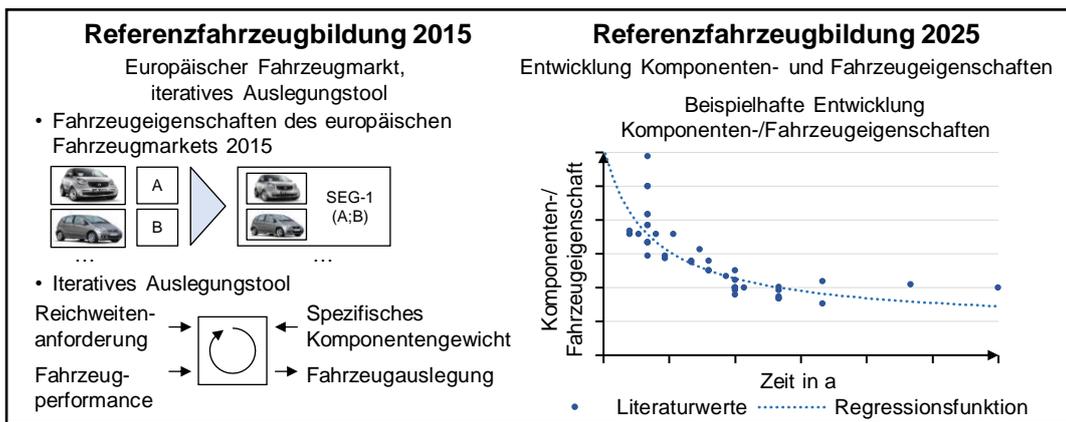
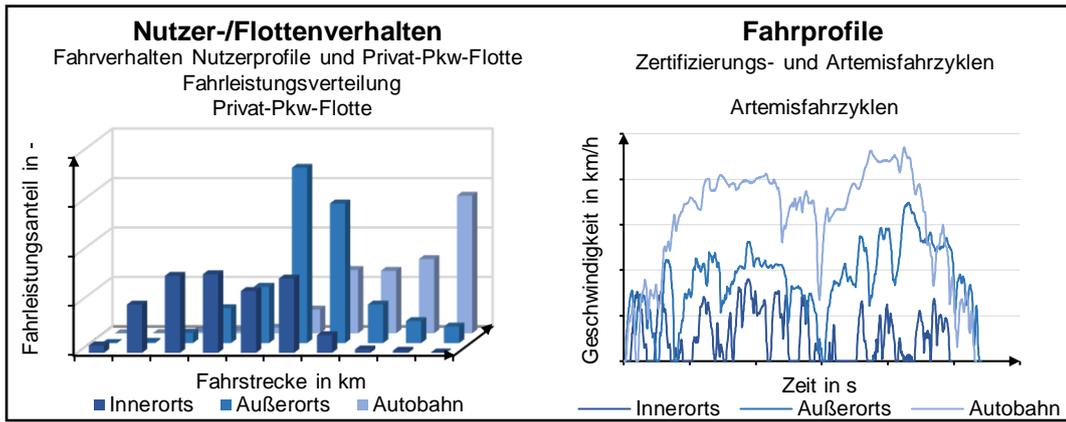


Abbildung 3-1 Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energieverbrauchs nach [20]

3.1.1 Nutzer-/Flottenverhalten und Fahrprofil

Mit dem Ziel das Nutzerverhalten möglichst realitätsnah abzubilden, wird zunächst das Fahrverhalten anhand der Datenerhebung der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ (MiD) [96] aus dem Jahr 2008 analysiert und anschließend mit der Fahrleistungserhebung aus dem Jahr 2004 [97], sowie den Artemisfahrzyklen Innerorts, Außerorts und Autobahn [28] kombiniert. Die Datenermittlung der MiD-Studie repräsentiert das Mobilitätsverhalten der deutschen Bevölkerung und beinhaltet unter anderem die Erfassung der Fahrtdauer, der Fahrlänge und der Fahrtstartzeit von privaten Pkw-Nutzern. Mittels der darin enthaltenen Datenschiebe, einer durchgeführten Zuordnung zu einem korrespondierenden Fahrzeugsegment und einer Plausibilisierung der Fahrten nach einer Fahrlänge kleiner als 1 000 km und nach einer durchschnittlichen Geschwindigkeit kleiner als 250 km/h ergibt sich ein Datensatz mit 63 792 Fahrten und einer gesamten Fahrleistung von 807 286 km. Über die Information der Aufteilung der Fahrstreckenanteile, aus der Fahrleistungserhebung des Jahres 2004, von 30 % Innerorts, 40 % Außerorts und 30 % auf der Autobahn werden die gefilterten Fahrten der MiD-Studie den jeweiligen Streckenprofilen über das Aufsummieren der Fahrleistung nach der durchschnittlichen Geschwindigkeit zugeordnet. An dem Beispiel für innerstädtische Fahrten bedeutet dies, dass die nach der Geschwindigkeit aufsteigend geordneten Fahrten so lange dem Innerortsprofil zugewiesen werden, bis 30 % der Fahrleistung erreicht sind. Durch diese Art der Zuteilung ergeben sich für die jeweiligen Zyklen die folgenden Durchschnittsgeschwindigkeiten: Fahrten mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit kleiner als 38 km/h werden dem Innerorts-, Fahrten mit einer mittleren Fortbewegungsrate zwischen 38 km/h und 67 km/h werden dem Außerorts- und Fahrten mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit größer als 67 km/h werden dem Autobahnzyklus zugeordnet. Die drei typischen Fahrprofile werden durch jene in dem Kapitel 2.2 beschriebenen Artemisprofile realitätsnah abgebildet. Diese besitzen eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 17,6 km/h, 57,4 km/h und 99,5 km/h und repräsentieren somit die betrachteten Fahrten auch hinsichtlich der mittleren Fortbewegungsrate sehr gut. Die Abbildung 3-2 a) stellt die ermittelte Verteilung der Fahrleistung über alle Segmente und einen gesamten Tag dar. Bei einer Betrachtung der gezeigten Fahrleistungsverteilung ist zu erkennen, dass die überwiegende Fahrleistung innerorts in dem Kurzstreckenbereich, außerorts in der Mitteldistanz und auf der Autobahn in dem Langstreckensektor stattfindet. Anzumerken ist hierbei, dass aufgrund der gewählten Zuordnung der Fahrprofile über die Durchschnittsgeschwindigkeit eine gewisse Unschärfe auftritt, da diese nicht immer das Fahrprofil eindeutig widerspiegelt – beispielsweise, wenn die durchschnittliche Geschwindigkeit aufgrund eines Staus während einer Autobahnfahrt merklich sinkt. Die Abbildung 3-2 b) visualisiert die angewandten Artemisfahrzyklen zu der Fahrleistungsverteilung farblich passend. Die Eigenschaften der Artemiszyklen sind in dem Abschnitt 2.2 ausführlich diskutiert.

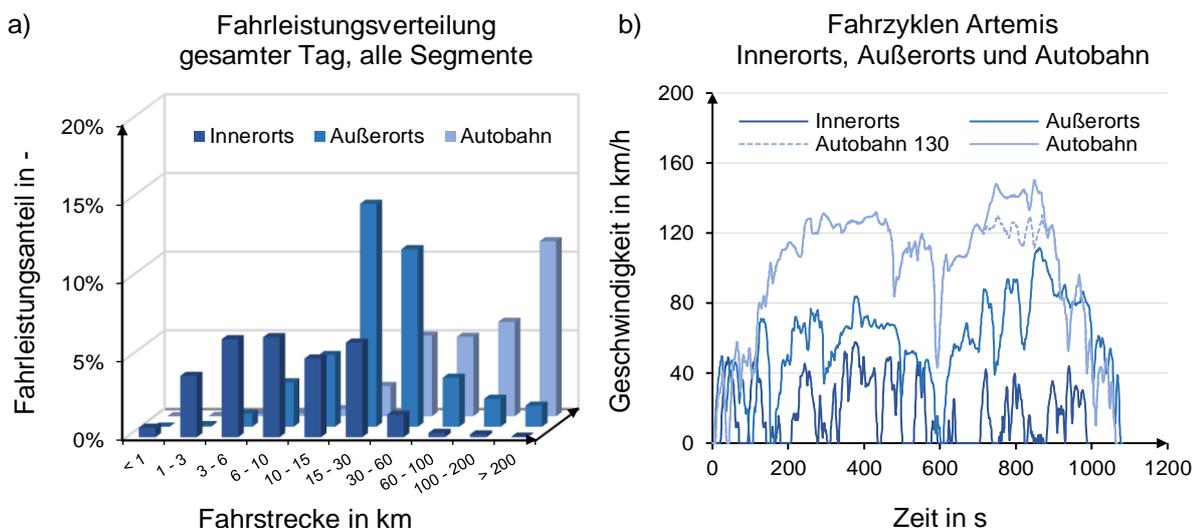


Abbildung 3-2 a) Verteilung der Fahrleistung über dem gesamten Tag und über alle Segmente nach [98]; Daten gefiltert aus [96] und b) Fahrzyklen Artemis Innerorts, Außerorts und Autobahn nach [28]

Mit der Zielsetzung sowohl einen transienten Effekt, einen Einschwingvorgang, der Nebenverbraucherleistung, sowie einen Einfluss auf den durchschnittlichen Verbrauch bei einem Wechsel eines Energiewandlers, beispielsweise von einem reinen Batterie- auf einen Brennstoffzellenbetrieb, hinreichend genau zu berücksichtigen, werden für Antriebe mit genau einem Energiewandler mindestens eine Stunde und für Varianten mit zwei Energiewandlern bei Bedarf zwei Stunden Fahrzeit simuliert. Des Weiteren wird, wie in der Abbildung 3-2 a) zu sehen, die Fahrleistung in zehn Fahrlängencluster, mit steigenden Distanzen, eingeteilt. Dies dient dazu, die simulierten Energieverbräuche in Abhängigkeit der Fahrtstrecke zu gewichten, den initial starken Einfluss der Nebenverbraucher zu respektieren und das typische, deutsche Mobilitätsverhalten abzubilden. Durch eine Gewichtung der Fahrprofilanteile und jener in dem Kapitel 3.1.3 beschriebenen Startzeitenverteilung ist es möglich einen annähernd repräsentativen Flottenverbrauch zu ermitteln, vgl. dazu Kapitel 6.1.3.

3.1.2 Referenzfahrzeugbildung 2015 und Referenzfahrzeugbildung 2025

In dem Sinne einer fairen und einer einheitlichen Vergleichbarkeit der Antriebe und eines Bestrebens einer repräsentativen Betrachtung des europäischen Fahrzeugmarkts des Betrachtungsjahrs 2015 werden zunächst drei Referenzfahrzeuge auf Basis konventioneller Antriebe ermittelt. Die Abbildung 3-3 visualisiert die Vorgehensweise der Konsolidierung der neun Fahrzeugsegmente der EU-Klassifizierung in die drei Fahrzeugklassen klein bzw. Seg-1, mittel bzw. Seg-2 und groß bzw. Seg-3. Die Fahrzeugklassen Kleinst- (A) und Kleinwagen (B) der EU-Klassifizierung werden zu der ersten Fahrzeuggröße zusammengefasst und repräsentieren ein kleines, kostengünstiges Fahrzeug. Die Segmente Mittelklasse (C), obere Mittelklasse (D), Mehrzweckfahrzeuge (M) und Geländewagen (J) bilden die zweite Fahrzeugform und spiegeln ein durchschnittliches Fahrzeug in dem mittleren Kostenbereich wider. Die verbleibenden Fahrzeugklassen, Oberklasse (E), Luxusklasse (F) und Sportwagen (S), entsprechen einem hochpreisigen Fahrzeug und stehen für das dritte Segment – groß. Die angewendete Einteilung der Segmente beruht auf [16] und einer plausiblen Annahme des Instituts für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen, dass in den so zusammengeführten, europäischen Fahrzeugklassen eine ähnliche Antriebsstrang-Technologie verbaut ist und somit gleichwertige Kraftstoffverbräuche, CO₂-Emissionen und Reduktionspotenziale vorherrschen.

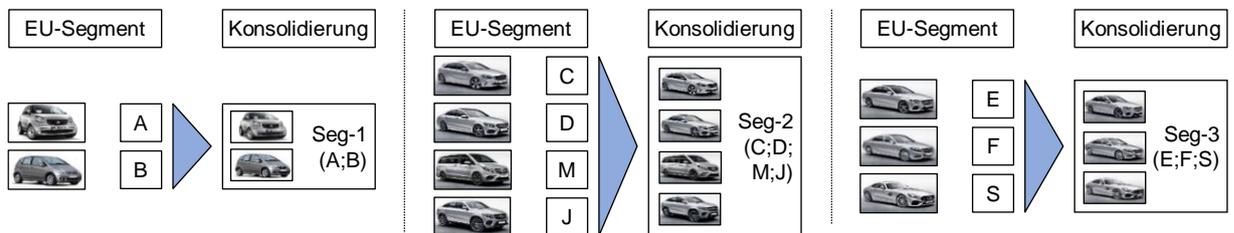


Abbildung 3-3 Einteilung der EU-Fahrzeugklassen in die Segmente klein, mittel und groß nach [16], [95]

Die Abbildung 3-4 zeigt das angewandte Vorgehen in dem Detail. Anhand der Darstellung wird die Methodik folgend erörtert. In einem ersten Schritt, oberer Bereich der Abbildung, wird eine Datenermittlung der zehn meistverkauften Fahrzeuge je europäisches Segment in dem Betrachtungsjahr 2015 durchgeführt, um anschließend mit der beschriebenen Konsolidierung die Fahrzeugeigenschaften der drei Referenzfahrzeuge in Europa für neu zugelassene Fahrzeuge in dem Betrachtungsjahr 2015 adäquat zu repräsentieren. Dabei werden jeweils die Eigenschaften der Benzin- und der Dieselvarianten der Pkws mit der segmentspezifischen durchschnittlichen Antriebsleistung ermittelt. Die darüber festgestellten Eigenschaften werden anschließend über eine Gewichtung der Verkaufszahlen der Fahrzeuge und der Antriebsart in dem betrachteten Segment zu den Referenzeigenschaften der Fahrzeugklasse gemittelt. Über das Verhältnis der gesamten Absatzzahlen der europäischen Fahrzeuggruppen, beispielsweise das Verhältnis der Verkaufszahlen von Kleinst- (Klasse A) und von Kleinwagen (Klasse B) für das Segmentfahrzeug klein, werden die Eigenschaften des segmentspezifischen Referenzfahrzeugs gebildet, vgl. Abbildung 3-4 oberer Bereich. Die Tabelle 3-1 visualisiert einige der resultierenden, gewichteten Eigenschaften der konventionellen Fahrzeuge für die drei Segmente. Die verwendeten Angaben zu den Durchschnittsleistungen der Fahrzeugsegmente entstammen der Veröffentlichung [99] des

iccts³⁴, die Verkaufszahlen der Fahrzeuge der Datenbank [100], die Fahrzeug- und die Komponenteneigenschaften den Datenbank [38] und [101], Angaben aus technischen Datenblättern verschiedener Fahrzeughersteller und Spezifikationen des After Sales, beispielsweise von [102].

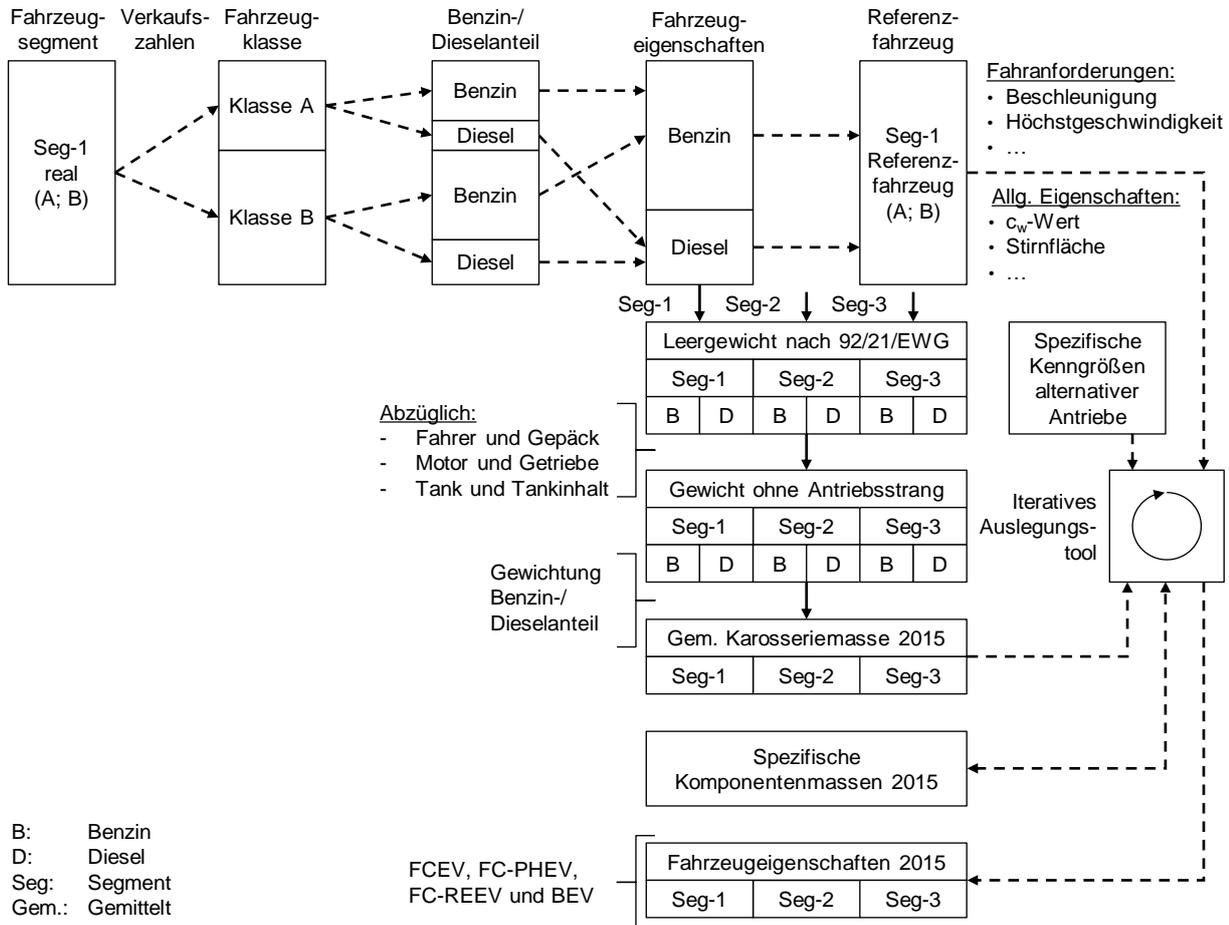


Abbildung 3-4 Methodik für die Ermittlung vergleichbarer Fahrzeugeigenschaften für das Betrachtungsjahr 2015

Für die konventionellen Referenzfahrzeuge ergeben sich aus der beschriebenen Gruppierung die drei Leistungsklassen ca. 60 kW, ca. 100 kW und ca. 180 kW für das kleine, das mittlere und das große Segment. Der konsolidierte c_w -Wert nimmt mit der Fahrzeugklasse ab und erzielt Werte zwischen 0,299 und 0,311. Die Stirnfläche steigt über die Segmente an. Die ermittelten Flächen liegen zwischen 2,08 m² und 2,27 m². Die Karosseriemasse wiegt zwischen 822 kg und 1 343 kg. Als Beschleunigungszeiten von 0 km/h auf 100 km/h werden 12,6 s in dem kleinen Segment, 10,5 s in dem mittleren Segment und 7,2 s in dem großen Segment erreicht. Als Höchstgeschwindigkeit wird eine Geschwindigkeit von 172 km/h bis zu 239 km/h erzielt.

Tabelle 3-1 Eigenschaften und Fahranforderungen der ermittelten, europäischen Referenzfahrzeuge

Eigenschaft \ Segment	Leistung	c_w -Wert	Stirnfläche	Karosseriemasse	Beschleunigung 0 km/h – 100 km/h	Höchstgeschwindigkeit
	kW	-	m ²	kg	s	km/h
Klein (Seg-1)	60,9	0,311	2,07	822,0	12,6	172,2
Mittel (Seg-2)	96,2	0,305	2,26	1 093,7	10,5	196,2
Groß (Seg-3)	175,5	0,299	2,27	1 343,4	7,2	239,3

³⁴ icct: Engl. international council on clean transportation europe. Z. Dt. Internationales Gremium für sauberen Transport in Europa.

Neben den beschriebenen Kriterien werden viele weitere, für eine gesamtheitliche Fahrzeugabbildung relevante, Kenngrößen gesammelt. Kühlergrößen, Motormassen, Getriebeübersetzungen, Fluidvolumen und weitere Merkmale werden recherchiert und analog mit den Verkaufsanteilen zu Referenzgrößen für die Fahrzeugklassen und Antriebsart gewichtet. Insgesamt werden, sofern verfügbar, mehr als 100 verschiedene Parameter pro Pkw für insgesamt 180 Fahrzeuge aufgenommen.

Wie die Abbildung 3-4 auf der Seite 52 zeigt, werden für eine Ermittlung der alternativen Referenzfahrzeuge aus den gewichteten Diesel- und den gewichteten Benzinsegmentfahrzeugen zunächst jene in der Richtlinie 92/21/EWG [103] definierte Massen des Fahrers und des Gepäcks abgezogen. Anschließend werden die antriebsstrangspezifischen Massen des Motors, des Getriebes, des Tanksystems, des Tankinhalts und des Abgassystems subtrahiert und über eine Gewichtung des Anteils der Benzin- und der Dieselfahrzeuge an den Verkaufszahlen des gruppierten Segments eine gemittelte, segmentspezifische Karosseriemasse für das Betrachtungsjahr 2015 ermittelt. Für eine Sicherstellung eines möglichst fairen Vergleichs der unterschiedlicher Antriebsarten wird des Weiteren die Prämisse angewandt, dass alle betrachteten Antriebsstrangvarianten ähnliche Kriterien der Performance bei einem gleichen Fahrzeugdesign und einer gleichen Fahrzeugausstattung (c_w -Wert, Stirnfläche und Rollwiderstandsbeiwert) erfüllen sollen. Die Merkmale Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungszeit von 0 km/h auf 100 km/h und die sog. Elastizitätszeit von 80 km/h auf 120 km/h werden dazu beispielsweise als Kriterien definiert. Die Tabelle 3-2 enthält die resultierenden, statischen und dynamischen Anforderungen für eine, die Mittelklasse repräsentierende, Fahrzeugvariante für das Betrachtungsjahr 2015.

Tabelle 3-2 Übersicht über die statischen und dynamischen Anforderungen an die Fahrleistung für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 2

Merkmal Antriebskonzept	Statische Anforderung			Dynamische Anforderung					
	Höchstgeschwindigkeit in km/h			Beschleunigungszeit 0 km/h – 100 km/h in s			Elastizität 80 km/h – 120 km/h in s		
	VM	EM		VM	EM		VM	EM	
		BAT	BZ		BAT	BZ		BAT	BZ
BEV		140			10,3			8,7	
FCEV		-	180		10,3			8,7	
FC-PHEV		130	180		10,3			8,7	
FC-REEV		140	130		10,3			8,7	
ICE-G- / ICE-D-Fzg	196			10,3			8,7		

BAT: Batterie BZ: Brennstoffzelle EM: Elektromotor Fzg: Fahrzeug VM: Verbrennungsmotor

Referenzfahrzeugbildung	Marktübliche Werte		Nicht vorhanden
Validierte Antriebsauslegung	xEV-Datenrecherche	-	Keine Anforderung

Die in dunkelblau hinterlegten Felder der Tabelle entsprechen den gemittelten Werten aus der Referenzfahrzeugbildung. Für das Mittelklassefahrzeug ist damit die Höchstgeschwindigkeit für die Fahrzeugvariante mit einem Verbrennungsmotor und für alle Antriebsvarianten die Beschleunigungszeit von 0 km/h auf 100 km/h definiert. Bei den Beschleunigungszeiten bedeutet ein über zwei Energiewandler angegebener Wert, dass beide Aggregate die angeforderte Leistung gemeinsam bereitstellen. Die Angaben mit einem grünen Hintergrund basieren auf marktüblichen Spezifikationen und werden mittels diesen festgelegt. In dem Rahmen dessen wird eine umfangreiche Datenrecherche über Fahrzeugeigenschaften in dem Betrachtungsjahr 2015 aktuell an dem Markt verfügbarer, elektrifizierter Fahrzeuge durchgeführt. Für ein reines Brennstoffzellenfahrzeug wird die gleiche maximale Geschwindigkeit wie für den Hauptantrieb bei den Plug-In-Varianten gesetzt. In dem Segment 2 wird für die Höchstgeschwindigkeit der Wert 180 km/h als minimales Kriterium verwendet. Der sekundäre Antrieb des Brennstoffzellen-Plug-In-Fahrzeugs wird mit einer reduzierten maximalen Geschwindigkeit ausgelegt. Für das Mittelklassefahrzeug werden 130 km/h bestimmt. Das Brennstoffzellen-Range-Extender-Fahrzeug soll in

dem batterieelektrischen Betrieb die gleiche Geschwindigkeit wie ein Batteriefahrzeug und in dem alleinigen Range-Extender-Antriebsmodus eine reduzierte Höchstgeschwindigkeit erreichen. In dem mittleren Segment werden deshalb 140 km/h bzw. 130 km/h gefordert. Für das Batteriefahrzeug des zweiten Segments ergibt sich aus der Datenrecherche eine durchschnittliche Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Darauf basierend wird diese als Mindestkriterium angewandt. Die Beschleunigungszeiten der Elastizität sind in Hellblau eingefärbt und fordern eine maximale Dauer von 8,7 s in dem zweiten Segment. Die benötigten Elastizitätszeiten werden in einem, in dem Rahmen einer betreuten studentischen Arbeit [104] entwickelten, Programmablauf errechnet, da keine offiziellen Angaben zu den jeweils benötigten Zeitdauern gefunden werden konnten. Das dabei angewandte iterativ arbeitende Auslegungstool wird in dem Anschluss, zusammen mit der angewandten Antriebsauslegung, beschrieben.

Zusätzlich zu den Performanceeigenschaften werden Mindestreichweiten festgelegt. Diesbezüglich wird der aktuelle Fahrzeugmarkt betrachtet und ein segmentspezifischer Durchschnitt als Kriterium für das Betrachtungsjahr 2015 gewählt. Für das dritte Segment des Batteriefahrzeugs wird der ermittelte Durchschnittswert reduziert, da die festgestellte Reichweite, welche lediglich auf den verschiedenen Fahrzeugvarianten der Firma Tesla Inc. basiert, zu einer deutlich zu hohen Fahrzeugmasse für ein repräsentatives Widerspiegeln der Fahrzeugklasse groß führt. Die Tabelle 3-3 listet die ermittelten Mindestkriterien für ein Fahrzeug der Mittelklasse auf.

Tabelle 3-3 Reichweitenanforderung und Leistungsbereitstellung in dem Zertifizierungszyklus für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 2

Merkmal	Statische Anforderung			Dynamisches Fahrprofil NEFZ					
	Reichweite in km			Spitzenleistung			Durchschnittsleistung		
	VM	EM		VM	EM		VM	EM	
		BAT	BZ		BAT	BZ		BAT	BZ
BEV		186			x			x	
FCEV		-	500		x	x		x	x
FC-PHEV		50	450		x	x		x	x
FC-REEV		100	400		x	-		x	x
ICE-G- / ICE-D-Fzg	951			x			x		

BAT: Batterie BZ: Brennstoffzelle EM: Elektromotor Fzg: Fahrzeug VM: Verbrennungsmotor

Referenzfahrzeugbildung	MiD-Fahrverteilung		Nicht vorhanden
Reichweitenvorgabe	xEV-Datenrecherche		x Anforderung
			- Keine Anforderung

Der in der Tabelle 3-3 dunkelblau hinterlegte Wert entstammt der Referenzfahrzeugbildung und entspricht der Reichweite des Benzinfahrzeugs in dem Zertifizierungszyklus. Für die Variante der Mittelklasse werden 951 km als Fahrstrecke verwendet. Für die Reichweiten der BEVs wird eine separate Recherche durchgeführt und eine Reichweite von 186 km für die Variante der Mittelklasse ermittelt. Die Angaben mit einem hellblauen Hintergrund basieren auf Vorgaben der Reichweite. Für die Varianten mit einem Brennstoffzellensystem wird eine Mindestreichweite von 500 km definiert. Diese Fahrlänge richtet sich nach Angaben der Reichweite der reinen Brennstoffzellenfahrzeuge der Fahrzeughersteller in dem Betrachtungsjahr 2015 [105] und ist damit als eine realistische Reichweite der Mittelklasse für Brennstoffzellenfahrzeuge zu erachten. Bei der elektrischen Reichweite für die Plug-In- und für die Range-Extender-Varianten wird für das Segment 2 eine Distanz von 50 km bzw. von 100 km angesetzt. Diese, rein batterieelektrische, Reichweite ist bei der Mitarbeit einer Aktualisierung der JEC-Studie „Tank-to-Wheel-Report“ [74] als marktüblich und als zertifizierungsrelevant erarbeitet worden. Mit dem Ziel für die Plug-In- und für die Range-Extender-Variante für die Segmente klein und groß ein vergleichbares Auslegungskriterium festzulegen, wird die Fahrleistung- und die Fahrtenverteilung über der Fahrstrecke für die drei unterschiedlichen Segmente untersucht. Wie die Abbildung 3-5 zeigt, werden dazu

die segmentspezifischen Fahrten und die Fahrleistung der MiD-Studie [96] über der Fahrleistung aufgetragen. Für die Ermittlung der Reichweiten für das kleine und für das große Segment wird in einem ersten Schritt aus der Reichweitenanforderung des Mittelklassefahrzeugs, Diagramm b), der Anteil der prozentualen Fahrleistung ermittelt. Dieser Anteil entspricht 66,4 % der Fahrleistung für die Plug-in- und 78,5 % der Fahrleistung für die REEV-Variante. Der jeweils erzielte Prozentsatz wird in einem zweiten Schritt für die Segmente klein und groß beibehalten und die korrespondierende Reichweite für die Plug-In- und für die Range-Extender-Variante ermittelt. Durch das angewandte Vorgehen bleibt die erreichbare, prozentuale, rein batterieelektrische Fahrleistung für alle drei Segmente identisch. Für den reinen Brennstoffzellenbetrieb der Variante FC-PHEV bzw. FC-REEV wird die Reichweite 450 km bzw. 400 km in dem zweiten Segment gefordert. Dies stellt sicher, dass eine Gesamtfahrlänge von 500 km als Mindestkriterium erreicht wird. Die beschriebenen Reichweiten beziehen sich auf den in dem jeweiligen Betrachtungsjahr gültigen Zertifizierungszyklus. Für das Betrachtungsjahr 2015 ist dies der NEFZ und für das Prognosejahr 2025 wird der WLTC angenommen. Für die Ermittlung der Mindestanforderungen der Segmente klein und groß wird analog der Beschreibung für das mittlere Segment vorgegangen. Die dabei festgestellten und definierten Kenngrößen sind in dem Anhang 1 bis Anhang 4 ersichtlich.

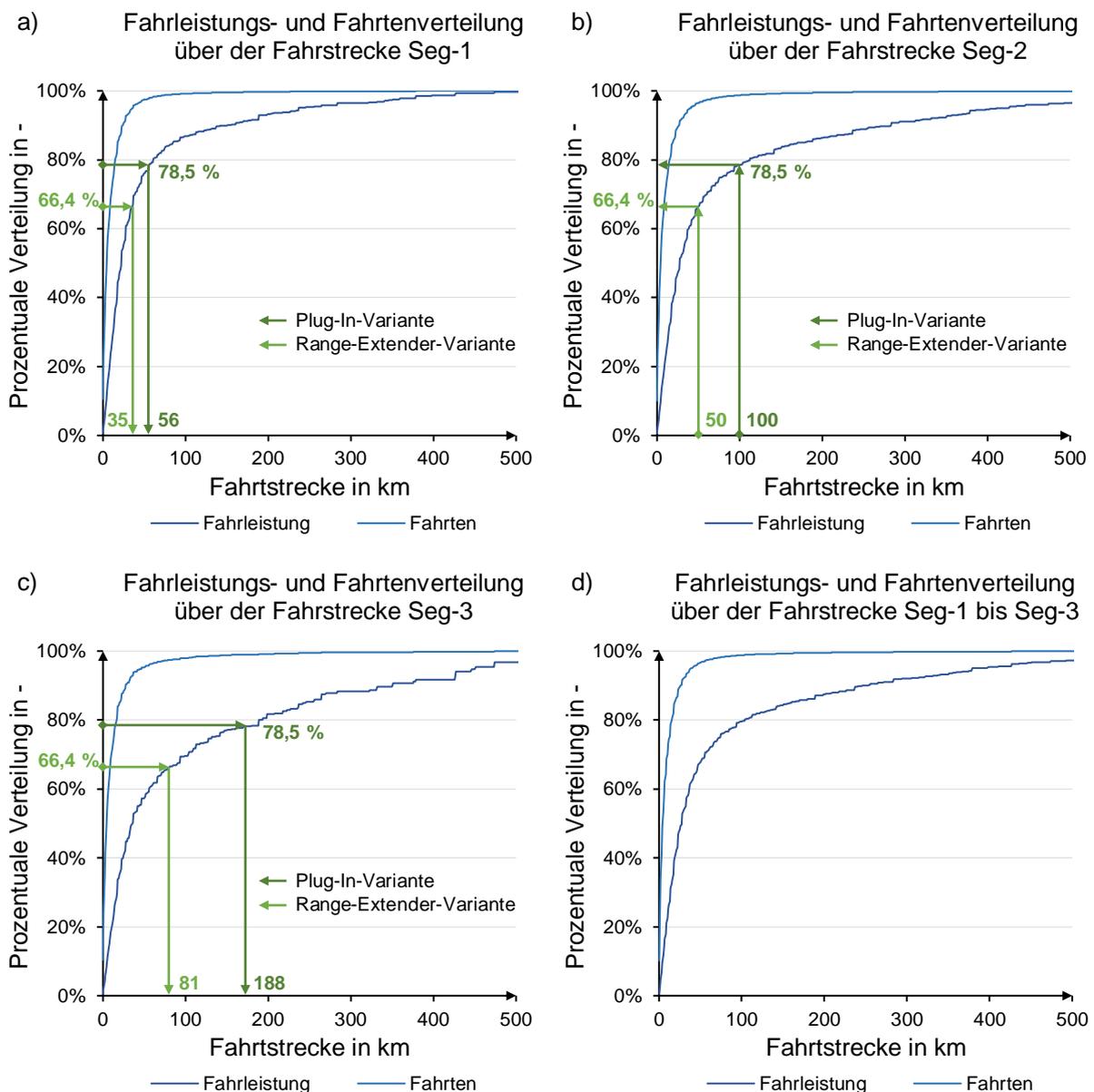


Abbildung 3-5 Fahrleistungs- und Fahrtenverteilung für die Bestimmung der batterieelektrischen Reichweite der Plug-In- und der Range-Extender-Varianten; Daten gefiltert aus [96], [97]

Neben der Anforderung der Reichweite wird für alternative Antriebe zudem festgelegt, unter welchen Bedingungen welcher Energiewandler bzw. welcher Energiespeicher eingesetzt wird. So wird beispielsweise für die hybriden Antriebsvarianten Brennstoffzellen-Plug-In und Brennstoffzellen-Range-Extender definiert, welche Fahrbedingungen und welche Fahrzyklen mit welcher Antriebsform allein oder nur kombiniert fahrbar bzw. erreichbar sind. In der Tabelle 3-3 auf der Seite 54, der Tabelle 3-4 und der Tabelle 3-5 sind die zu der Auslegung dienenden Spitzen- und Dauerleistungen je Energiewandler fahrzyklusspezifische aufgelistet. Für die aufzubringende Dauerleistung der Artemisfahrzyklen wird zusätzlich zu der zyklusbedingten Leistung eine durchschnittliche Nebenverbraucherleistung einkalkuliert, um beispielsweise den Ladezustand während des Einschwingvorgangs der Nebenverbraucherleistung zu halten. Für das erste Segment werden 4 kW, für das zweite Segment werden 5 kW und für das dritte Segment werden 6 kW elektrisch berücksichtigt.

Tabelle 3-4 Anforderungen an die Antriebsvarianten durch die Spitzenleistung in den Fahrprofilen

Anforderung Antriebskonzept	Dynamische Fahrprofile Spitzenleistung								
	Artemis Innerorts			Artemis Außerorts			Artemis Autobahn		
	VM	EM		VM	EM		VM	EM	
		BAT	BZ		BAT	BZ		BAT	BZ
BEV		x			x			x	
FCEV		Kombiniert			Kombiniert			Kombiniert	
FC-PHEV		x	x		x	x		Kombiniert	
FC-REEV		x	-		x	-		x	-
ICE-G- / ICE-D-Fzg	x			x			x		

BAT: Batterie BZ: Brennstoffzelle EM: Elektromotor Fzg: Fahrzeug VM: Verbrennungsmotor

	Nicht vorhanden	x	Anforderung	-	Keine Anforderung
--	-----------------	---	-------------	---	-------------------

Tabelle 3-5 Anforderungen an die Antriebsvarianten durch die Durchschnittsleistung in den Fahrprofilen

Anforderung Antriebskonzept	Dynamische Fahrprofile Durchschnittsleistung								
	Artemis Innerorts			Artemis Außerorts			Artemis Autobahn		
	VM	EM		VM	EM		VM	EM	
		BAT	BZ		BAT	BZ		BAT	BZ
BEV		x			x			x	
FCEV		-	x		-	x		-	x
FC-PHEV		x	x		x	x		x	x
FC-REEV		x	x		x	x		x	x
ICE-G- / ICE-D-Fzg	x			x			x		

BAT: Batterie BZ: Brennstoffzelle EM: Elektromotor Fzg: Fahrzeug VM: Verbrennungsmotor

	Nicht vorhanden	x	Anforderung	-	Keine Anforderung
--	-----------------	---	-------------	---	-------------------

Sowohl das reine Batteriefahrzeug als auch das ICE-G- oder das ICE-D-Fahrzeug besitzt nur einen Energiewandler und einen Energiespeicher. Aus diesem Grund werden diese so ausgelegt, dass alle Anforderungen mittels diesem erreicht werden. Die anderen Antriebsvarianten besitzen mehrere Energiewandler. Diese werden deshalb auf unterschiedliche Anforderungen abgestimmt ausgelegt. Bei einem Brennstoffzellenfahrzeug wird das Hybridbatteriesystem so implementiert, dass dieses die Spitzenleistung sowohl in dem NEFZ bzw. in dem WLTC als auch in dem Fahrprofil Artemis Innerorts bereitstellen kann. Diese Auslegung des Batteriesystems dient dem Zweck starke Beschleunigungen zu puffern und den Anfahrvorgang abzusichern. Der Range-Extender des FC-REEVs wird so konfiguriert, dass dieser die Dauerleistung aller Zyklen zu der Verfügung stellen kann. Die Abdeckung der Durchschnittsleistungen wird angewandt um den Ladezustand, beispielsweise während einer Fahrt zwischen zwei Städten, zu halten und die Reichweite des Fahrzeugs, wie die Fahrtypbezeichnung inkludiert, zu

verlängern. Für die Brennstoffzellen-Plug-In-Varianten wird definiert, dass alle Anforderungen der Fahrzyklen erreicht werden. Dadurch wird eine normale Nutzung sowohl in dem reinen Brennstoffzellenbetrieb als auch in dem batterieelektrischen Betrieb sichergestellt. Einzig die Höchstgeschwindigkeit ist für den letztgenannten Modus reduziert. Für alle Batteriesysteme geltend, wird die zu verbauende Energiemenge der Batteriespeichersysteme zelltypabhängig bestimmt. Sowohl das nutzbare SOC-Fenster als auch die maximal zulässige C-Rate der verschiedenen Zellchemie wird für die Bestimmung der benötigten Energiemenge des Batteriesystems berücksichtigt und das resultierende Maximum verwendet. Sollte beispielsweise die benötigte Kapazität aufgrund des Energieinhalts kleiner als jene basierend auf der Leistungsanforderung ausfallen, wird jene durch die C-Rate bestimmte Kapazität berücksichtigt.

Für eine, auf den Anforderungen beruhende, bedarfsgerechte Konfiguration der Antriebsstränge wird ein Auslegungstool benötigt. Dieses wird iterativ arbeitend programmiert, um die jeweils über die spezifischen Antriebsstrangkenngrößen neu definierte Leistung der Energiewandler und der Fahrzeugmasse zu berücksichtigen. Die Abbildung 3-6 stellt den ersten Teil des Programms für die Berechnung der dynamischen Anforderungen dar. Die Abbildung 3-7 auf der Seite 59 visualisiert den gesamten Ablauf des Auslegungstools. Das entwickelte Programm ist in VBA³⁵ umgesetzt und wurde zusammen mit [104] geschrieben.

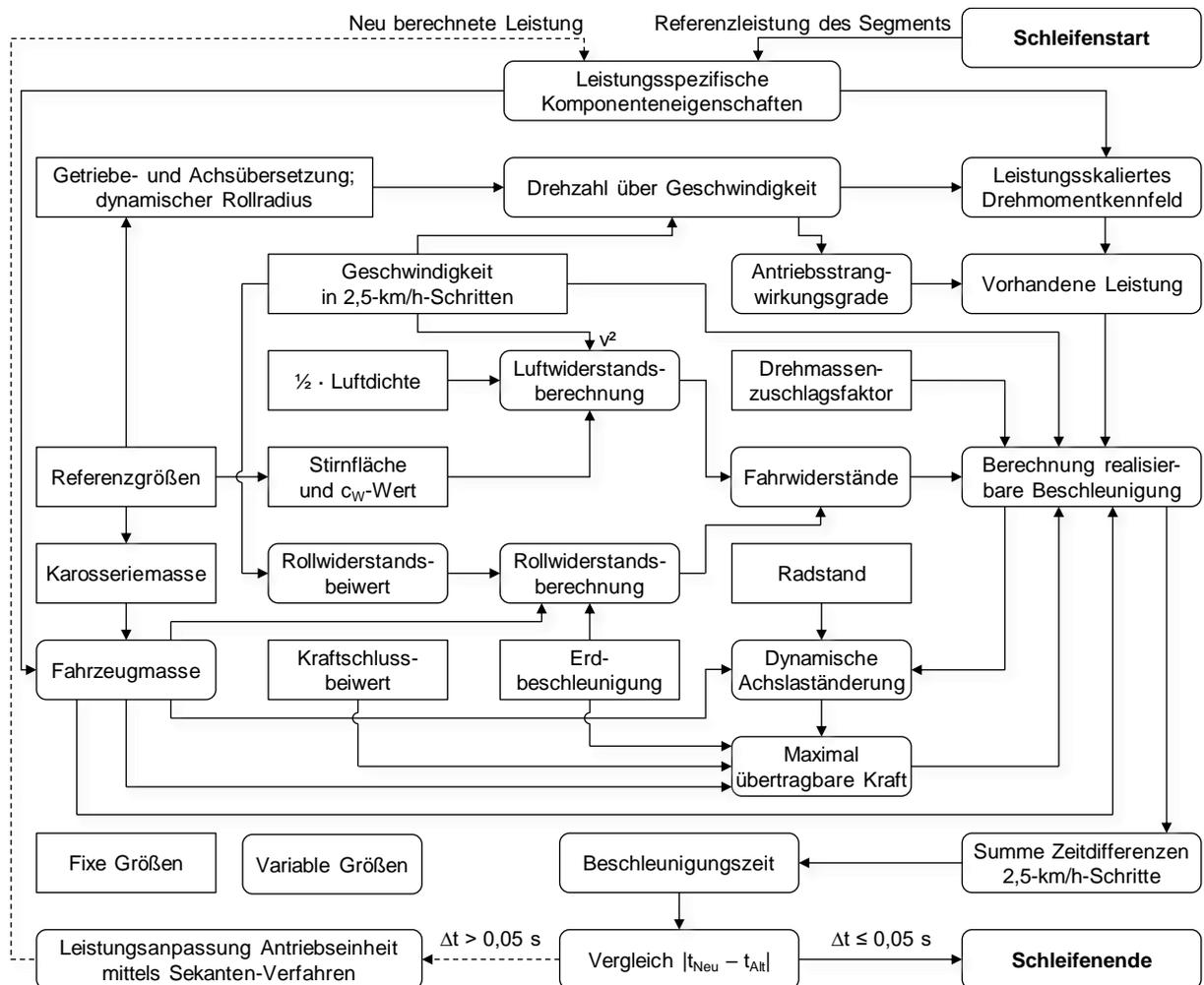


Abbildung 3-6 Iteratives Auslegungstool für die Berechnung der dynamischen Anforderungen

³⁵ VBA: Abkürzung für Visual Basic Applikation. VBA ist eine Programmiersprache zur Steuerung von Abläufen der Programmfamilie von Microsoft-Office.

In der ersten Iterationsschleife werden die vorab definierten, dynamischen Anforderungen, die Beschleunigungszeit von 0 km/h auf 100 km/h und die Elastizitätszeit von 80 km/h auf 120 km/h, vorgegeben, um die Komponenten des Antriebsstrangs auszulegen. Die Iteration wird initial mit der Leistung des jeweiligen Segments initiiert. Über leistungsskalierte Drehmomentkennfelder wird in dem Verbund mit einer, über die Übersetzung und die Fahrgeschwindigkeit bekannten, Drehzahl und den dazugehörigen Wirkungsgraden des Antriebsstrangs die maximale vorhandene Leistung lastpunktspezifisch ermittelt. Diese wird zusammen mit den Fahrwiderständen verrechnet und die verfügbare Kraft für eine Beschleunigung bestimmt. Da nicht immer die gesamte, verfügbare Beschleunigungsleistung auf die Straße übertragen werden kann, wird die maximal umsetzbare Beschleunigungskraft benötigt. Dazu wird die Kraftschlussgrenze mittels einer beschleunigungsabhängigen, dynamischen Achslast, dem Haftbeiwert und der Erdbeschleunigung errechnet. Anschließend wird das Minimum aus der physikalisch maximal übertragbaren und der durch den Antrieb bereitgestellten Kraft zu der Berechnung der realisierbaren Beschleunigung herangezogen. Die gesamte Beschleunigungszeit wird bestimmt, indem diskrete Zeitdifferenzen für eine Geschwindigkeitserhöhung um jeweils 2,5 km/h ermittelt und aufsummiert werden. Nach einer Iteration wird die resultierende Ist- mit der Sollbeschleunigungszeit aus der Referenzfahrzeugbildung verglichen. Ist die Abweichung dabei größer als 0,05 s, werden die antriebspezifischen Kenngrößen erhöht, die Kennfelder, die Antriebskomponentenmasse und somit die resultierende Gesamtfahrzeugmasse angepasst und die Beschleunigungszeit erneut berechnet. Ist die zeitliche Differenz nach einer Iteration kleiner gleich 0,05 s, wird die iterative Schleife verlassen und die Rechnung beendet. Während der durchgeführten Berechnung wird der Rollwiderstand in Abhängigkeit der Geschwindigkeit berücksichtigt. Dazu wird aus [4] reifen- und damit segmentspezifisch ein Verlauf des nicht gewichteten Mittelwerts des angegebenen Streubereichs des Rollwiderstands des jeweiligen Reifentyps ermittelt, auf den verwendete Rollwiderstand für das Jahr 2015 bzw. für das Jahr 2025 normiert und das geschwindigkeitsabhängige Verhalten in der Berechnung angewandt. Für das Segment 1 und das Segment 2 wird das Verhalten eines Reifens mit dem Geschwindigkeitsindex S oder T, bis 180 km/h bzw. bis 190 km/h, und für das Segment 3 mit dem Geschwindigkeitsindex H, V, W oder Z aufgrund einer höheren Endgeschwindigkeit herangezogen. Die Datenbasis für die Ermittlung des geschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstandsbeiwerts ist in dem Anhang 5 dokumentiert. Für die Berechnung der beschleunigungsabhängigen, dynamischen Achslast wird ebenfalls [4] verwendet. Für eine Berücksichtigung der gangabhängigen Massenfaktoren werden Angaben aus [106] angewandt. In dem Berechnungstool erfolgt ein Wechsel einer Übersetzungsstufe sobald die überschüssige Leistung in dem nächst höheren Gang größer als jene in dem aktuellen Gang ist. Für einen Gangwechsel werden für manuelle Getriebe 0,25 s als Schaltdauer definiert.

Mit dem Ziel die ermittelten Beschleunigungszeiten zu überprüfen, werden die drei Referenzfahrzeuge mit den beiden Verbrennungsmotorvarianten nachgebildet und die Zeitspannen für die Beschleunigung von 0 km/h auf 100 km/h ermittelt. Die Tabelle 3-6 stellt die berechneten Ergebnisse den Zeitspannen aus der Referenzfahrzeugbildung gegenüber.

Tabelle 3-6 Validierung des iterativen Beschleunigungstools nach [104]

Referenzfahrzeug		Beschleunigungszeit 0 km/h – 100 km/h Berechnung	Beschleunigungszeit 0 km/h – 100 km/h Referenzfahrzeug	Differenz absolut	Differenz relativ
		s	s	s	-
Benzin	Seg-1	12,6	13,1	-0,5	-3,7 %
	Seg-2	10,5	10,0	0,6	5,6 %
	Seg-3	7,2	6,3	1,0	15,3 %
Diesel	Seg-1	11,9	11,6	0,2	1,9 %
	Seg-2	10,0	10,4	-0,4	-4,2 %
	Seg-3	7,3	7,2	0,1	1,0 %

Aus der Tabelle 3-6 geht hervor, dass die errechneten Zeiten leicht von den ermittelten Angaben abweichen. Die größte Differenz beträgt ca. 1,0 s und tritt bei dem Benzinfahrzeug des dritten Segments auf. Die relative Abweichung von 15,3 % ist dabei durch einen häufig verbauten Allradantrieb, bei welchem eine dynamische Kraftverteilung angenommen wird, bedingt. Die restlichen Zeitdifferenzen liegen zwischen -0,5 s und +0,6 s. Die relative Abweichung ist in diesen Fällen kleiner als 5,6 %. Insgesamt bildet das Berechnungstool die Beschleunigungszeit somit valide ab. Dieses wird deshalb für die Berechnung der Beschleunigung von 0 km/h auf 100 km/h und für jene von 80 km/h auf 120 km eingesetzt.

Für eine Antriebsauslegung müssen neben den beiden Beschleunigungszeiten die Mindestkriterien Höchstgeschwindigkeit, Dauer- und Spitzenleistung der Zyklen und die Reichweitenanforderungen in dem Zertifizierungszyklus berücksichtigt werden. Die Abbildung 3-7 stellt den dafür angewandten Ablauf des Auslegungstools, mit der integrierten Berechnung der Beschleunigungszeit, dar.

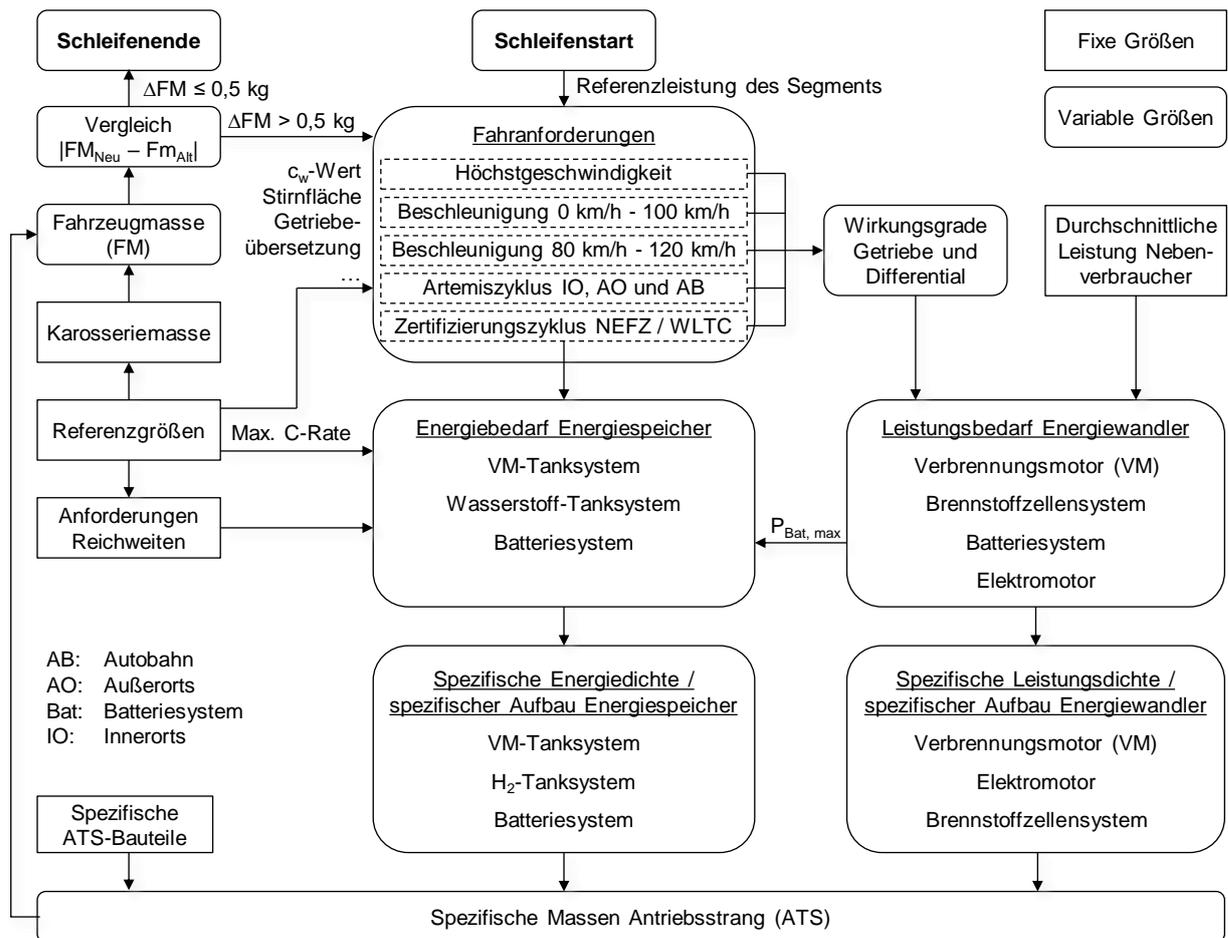


Abbildung 3-7 Iteratives Auslegungstool für eine bedarfsgerechte Auslegung der Antriebe

Initiiert wird der Ablauf des iterativen Programms mit der Referenzleistung des jeweiligen Segments. Mit einer iterativ berechneten Fahrzeugmasse werden zusammen mit den Fahrzeugparametern, wie beispielsweise dem c_w -Wert oder der Stirnfläche, und den Fahrwiderständen der Energiebedarf in dem Zertifizierungszyklus, die Höchstgeschwindigkeit, die Beschleunigungszeiten und die Leistungsbedarfe in den verschiedenen Fahrzyklen berechnet. Über den Energiebedarf in dem Zertifizierungszyklus wird mittels der Anforderung an die Reichweite ein Kriterium für die Auslegung der Energiespeicher bestimmt. Bei Antriebssträngen mit einem Batteriesystem wird zusätzlich über die benötigte Batterieleistung und die zelltypabhängige C-Rate eine Mindestkapazität für das Batteriesystem berechnet. Für die Dimensionierung wird das Maximum der benötigten Kapazität gewählt. Die weiteren Energiespeicher, das Wasserstofftanksystem und das konventionelle Tanksystem, werden über die jeweils geforderte

Reichweite bestimmt. Der Leistungsbedarf für die Höchstgeschwindigkeit wird statisch über die Fahrwiderstände ermittelt. Die notwendige Leistung wird als Dauerleistung definiert, da die Geschwindigkeitsvorgabe permanent gehalten wird. Für das reine batterieelektrische Fahrzeug und die Brennstoffzellenvarianten wird über die Höchstgeschwindigkeit das einstufige Übersetzungsverhältnis festgelegt. Dabei wird das Getriebe so ausgelegt, dass bei der maximalen Drehzahl des Elektromotors die maximale Fahrgeschwindigkeit erreicht wird. Die Ermittlung der Beschleunigungszeiten erfolgt in der bereits erklärten separaten Iterationsschleife. Hier wird das Sekanten-Verfahren [107], eine Vereinfachung des Newton-Raphson-Verfahrens, angewandt, um mit einer möglichst geringen Iterationsanzahl die Nullstelle der Funktion, hier der Leistungsbedarf für die Erreichung der Beschleunigungszeit, zu finden. Die Abbildung 3-8 a) zeigt das Sekanten-Verfahren beispielhaft. Bei diesem werden zunächst über zwei Startwerte, hier Leistungsanforderungen, die jeweiligen Funktionswerte, hier die Zeitabstände der Beschleunigungszeit, ermittelt und eine Sekante gebildet. Dessen Nullstelle wird als neuer x-Wert herangezogen und mit dem dazugehörigen y-Wert eine neue Sekante ermittelt. Folgend wird wieder dessen Nullstelle berechnet und ein neuer x-Wert festgelegt. Diese Prozedur erfolgt so lange, bis der y-Wert, hier die Zeitdifferenz, innerhalb eines Akzeptanzkorridors liegt. Dieser ist in der Abbildung mit den quer gestrichelten Linien eingezeichnet. In dem dargestellten Beispiel ist das Kriterium „y-Wert im Akzeptanzkorridor“ nach vier Schritten erreicht.

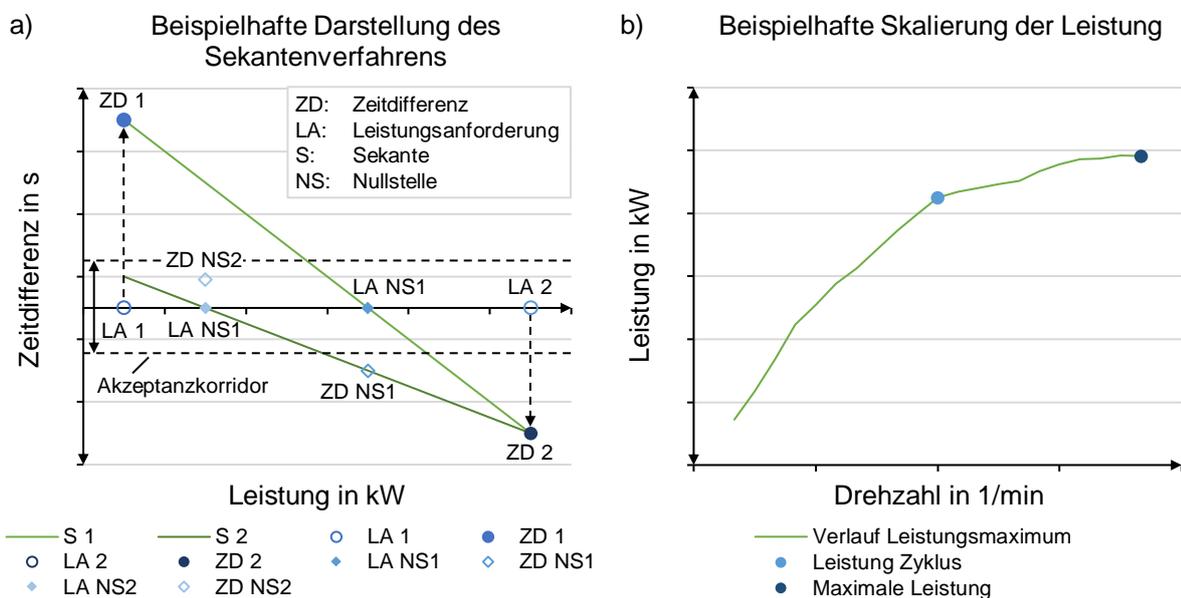


Abbildung 3-8 a) Beispielhafte Darstellung des Sekanten-Verfahrens und b) beispielhafte Ermittlung der benötigten, maximalen Leistung basierend auf der in einem Zyklus benötigten Leistung nach [104]

Für eine Feststellung der Spitzenleistungen der Fahrzyklen wird die benötigte Leistung zu jedem Zeitpunkt des Zyklus betrachtet und über das Leistungskennfeld die maximale Leistung des Energiewandlers ermittelt. Die Abbildung 3-8 b) zeigt ein fiktives Beispiel für die Verschiebung des in dem Zyklus bestimmten Leistungsbedarfs auf die Maximalleistung des Energiewandlers. Die Berechnung der maximalen Leistung der Komponente ist notwendig, um mit der leistungsspezifischen Energiedichte die Masse des Energiewandlers zu bestimmen. Für eine Berechnung der durchschnittlichen Leistung des Zyklus wird der notwendige Energiebedarf in dem Zyklus und jener der Nebenverbraucher über der Fahrzeit gemittelt. Dabei wird eine mögliche Leistung durch eine Rekuperation berücksichtigt, indem die maximale, negative elektrische Leistung durch eine maximale Leistung des Elektromotors, einer maximalen Leistungsaufnahme des Batteriesystems und die Wirkungsgradkette des Antriebsstrangs beachtet wird. Die Durchschnittsleistung ist vor allem für eine Range-Extender-Variante wichtig, da diese, beispielsweise während einer Autobahnfahrt zwischen zwei Städten, den Ladezustand bei dem Verlassen einer Stadt halten soll, um bei einer Ankunft in eine Stadt wieder rein batterieelektrisch zu fahren.

Mit jenen, durch die Leistungsgrößen und der Anforderungen der Reichweiten bestimmten, Ausprägungen der Komponenten wird über spezifische Komponenteneigenschaften die neue Komponentenmasse berechnet. Die dabei verwendeten spezifischen Komponentengrößen sind abhängig von der jeweiligen Systemgröße. Beispielsweise skaliert die Masse eines Elektromotors nicht linear mit dessen Leistung. Eine separate Kalkulation der Leistungs- bzw. der Energiedichte wird deshalb durchgeführt, um diesem Effekt Rechnung zu tragen. Auf die angewandte Berechnung und das Ermitteln der spezifischen Komponentenmasse wird in dem Kapitel 3.3 explizit eingegangen. Die ermittelte Fahrzeugmasse der letzten Iterationsschleife wird anschließend für die nächste Berechnung verwendet. Ist die Differenz zu der nächstberechneten Fahrzeugmasse kleiner als 0,5 kg, wird die durchgeführte Iteration beendet. Mit dem Abgleich der Fahrzeugmasse wird sichergestellt, dass die Anforderungen an die Leistung und jene an die Reichweiten berücksichtigt sind. Durch das beschriebene Auslegungstool werden die verschiedenen Eigenschaften der Antriebsvarianten bestimmt und in der gesamtheitlichen Simulation für das Betrachtungsjahr 2015 berücksichtigt.

Für die Ermittlung der Eigenschaften der Antriebsvarianten für das Prognosejahr 2025 wird methodisch analog vorgegangen. Lediglich die Eingangsparameter in das iterativ arbeitende Auslegungstool werden angepasst. Die Abbildung 3-9 zeigt die dabei angewandte Vorgehensweise für die Auslegung der Antriebe. Für die Bestimmung der Fahrzeugeigenschaften werden die Fahranforderungen (FA) und die allgemeinen Eigenschaften (E), die Karosseriemasse und die spezifischen Komponentenmassen des Betrachtungsjahrs 2015 auf das Prognosejahr 2025 entwickelt und in dem beschriebenen Auslegungstool berücksichtigt. Die Entwicklung der verschiedenen Eingangsgrößen ist in dem Kapitel 3.2, in dem Kapitel 3.3 und in dem Kapitel 3.4 in dem Detail beschrieben.

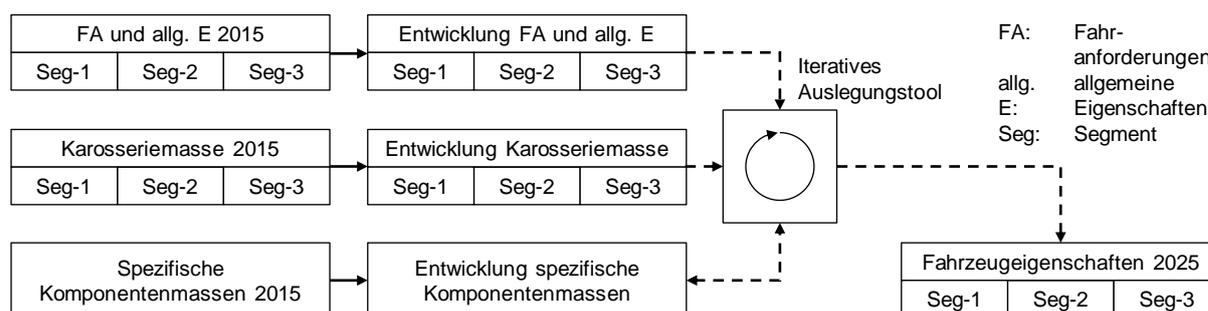


Abbildung 3-9 Vorgehensweise für die Auslegung der Antriebe für das Prognosejahr 2025

3.1.3 Wetter- und Startbedingungen

Mit dem Ziel einer realitätsnahen Verbrauchsermittlung muss der Bedarf der Nebenverbraucher korrekt abgebildet werden. Dies gilt insbesondere für eine Berücksichtigung der notwendigen Leistung für das Heizen und für das Kühlen der Fahrgastzelle. Dabei ist es essenziell die vorherrschenden Bedingungen sowohl bei dem Beginn als auch während der Fahrt in dem Fahrzeug und um das Transportmittel herum zu kennen, um den benötigten Leistungsbedarf realitätsnah zu repräsentieren. Da beispielsweise die Temperatur und die Sonneneinstrahlung über dem Tag schwanken, wird als Erstes die Startzeiten der betrachteten Fahrten für eine realitätsnahe Verbrauchsermittlung benötigt. Der in dem Kapitel 3.1.1 plausibilisierte Datenpool der MiD-Studie wird diesbezüglich als Datenbasis herangezogen und analysiert. Die enthaltenen Fahrten des Datensatzes werden nach ihren Startzeiten in Abschnitte von je einer Stunde gruppiert. Fünf Tageszeiten werden festgelegt und der jeweilige Schwerpunkt der Fahrtantritte über die Verteilung der Fahrleistung wird ermittelt. Eine Definition der Tagesabschnitte in den Morgen, in den Vormittag, in den Mittag und in den Nachmittag, sowie in den Abend wird dabei gewählt, um unterschiedliche Nutzerprofile abzubilden. Durch die getroffene Wahl kann beispielsweise das Verhalten eines typischen Arbeitnehmers durch unter der Woche stattfindende Fahrten zu der Arbeit und zu dem Wohnort, sowie vereinzelt Fahrten zu einem Supermarkt als auch Fahrten an einem Wochenende dargestellt werden.

Die Abbildung 3-10 visualisiert die Aufteilung der Startzeiten und den Anteil an der Fahrleistung je Tagesstunde. Über die Verteilung der Fahrleistung wird für morgens als Startzeit 07:06 Uhr, für vormittags 10:54 Uhr, für mittags 14:36 Uhr, für nachmittags 17:18 Uhr und für abends 20:36 Uhr ermittelt. Die Fahrleistungsverteilung liegt dabei bei 23,6 %, bei 23,4 %, bei 19,8 %, bei 23,2 % und bei 10,0 %. Während die ersten vier Tageszeiten einen ähnlichen Anteil an der Fahrleistung aufweisen, ist die Fahrleistung abends auf etwa die Hälfte in dem Vergleich zu den anderen Tageszeiten reduziert.

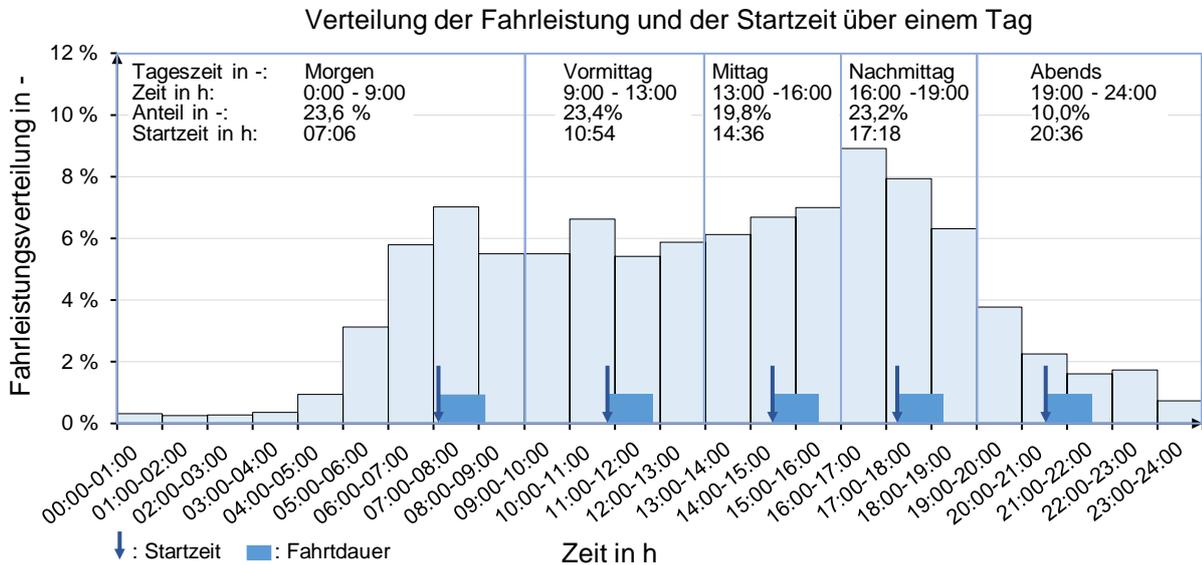


Abbildung 3-10 Verteilung der Fahrleistung und der Startzeit über einem Tag nach [98], Daten aus [96]

In dem Rahmen der Startzeiten wird zudem der Wittereinfluss berücksichtigt, um zu den definierten Fahrzeitpunkten sowohl die Bedingungen bei einem Start der Fahrt als auch währenddessen zu kennen. Je nach Klima- und je nach Parksituation weisen die Fahrzeugkabine und dessen Einbauten unterschiedliche Initialtemperaturen auf. Durch einen hohen Wert der Sonneneinstrahlung in der Jahreszeit Sommer wird beispielsweise die Fahrgastzelle aufgeheizt und der anfängliche Kühlbedarf erhöht. Theoretisch müssten deshalb 365 Tagesverläufe simuliert werden, um den Energiebedarf exakt wiederzugeben. Dieser Umfang an Simulationen ist aufgrund der Rechenzeit einer Gesamtfahrzeugsimulation (GFS) jedoch nicht möglich. In dem Rahmen dieser Arbeit wird daher eine Methodik entwickelt, um den Energiebedarf der Fahrgastzelle trotz verringerter Klimaprofile möglichst detailliert abzubilden. Die angewandte Vorgehensweise wurde zusammen mit den beiden betreuten Studienarbeiten [98] und [108] entwickelt. Die Abbildung 3-11 auf der Seite 63 zeigt die Methodik der Gewichtung und der Einteilung der Wetterdaten auf. Diese wird folgend erläutert.

Sowohl regionale Wetterbedingungen als auch der jeweilige Fahrzeugbestand der Regionen muss in eine Gewichtung der Umweltbedingungen einfließen, um den Wittereinfluss auf den Energiebedarf eines Fahrzeugs in einem Land repräsentativ abzubilden. Mit dem Ziel dies umzusetzen, werden für die betrachteten Länder – Spanien, Deutschland und Norwegen – die Verteilungen der Regionen einheitlich anhand der europäischen Regionseinteilung NUTS³⁶ [109] definiert. In Deutschland entsprechen die NUTS-1-Regionen den Bundesländern. Zu den jeweiligen geografischen Bereichen wird der Klimaverlauf in dem bevölkerungsgewichteten, geografischen Schwerpunkt des jeweiligen Bundeslands [110] herangezogen, um ein durchschnittliches Klima der Region abzubilden. Die Ermittlung des bevölkerungsgewichteten, regionalen Wetterprofils wird mittels der Software Meteororm [111] auf einstündiger Auflösung durchgeführt. Dabei werden aus vorhandenen Wetterstationen, welche in dem näheren Umfeld des betrachteten, geografischen Orts liegen, die Wetterdaten entnommen und in den Schwerpunkt

³⁶ NUTS: Frz.: Nomenclature of territorial units for statistics, z. Dt. Nomenklatur der Gebietseinheiten für statistische Auswertungen der Europäischen Union.

interpoliert. Die somit definierten, lokalen Wetterdatensätze werden anschließend mit dem Fahrzeugbestand der Regionen aus [110] multipliziert und über den gesamten Fahrzeugbestand des betrachteten Lands gewichtet. Aus dem Vorgehen resultieren 365 landspezifische Wetterverläufe. Aufgrund einer erhöhten Rechenzeit einer GFS kann nicht jeder Tagesverlauf simuliert werden und eine Reduktion der Anzahl der Simulationen mit einem möglichst geringen Einfluss auf den Energieverbrauch ist notwendig. Verschiedene Überlegungen, unter anderem typische Tagesverläufe und Mittel- und Extremwerte der Jahreszeiten, wurden angestellt und die folgende Methodik erarbeitet. Zunächst werden die Tagesverläufe den meteorologischen Jahreszeiten zugeordnet, um einen saisonalen Einfluss zu betrachten. Anschließend werden die Wetterdatensätze (Temperatur, Sonnenstrahlung, Feuchtigkeit und Druck) über die Temperaturen stündlich nach dessen Gradzahl aufsteigend geordnet. Mit einem, durch die Rechenzeit der GFS vorgegebenen, Ziel die Anzahl der Wetterprofile auf 20 Profile zu reduzieren, werden je fünf gleichgewichtete Tagesverläufe pro Jahreszeit ermittelt. Dazu werden zu jeder der stündlich sortierten Temperaturen fünf Temperaturklassen gebildet. Diese entsprechen somit jeweils 20 %. Zu jedem Bereich werden der stündliche Mittelwert der Temperaturen und jeweils die direkt verknüpften Wetterdaten, Sonnenstrahlung, Feuchtigkeit und Druck, berechnet. Die Abbildung 3-11 zeigt die nach dieser Methodik erzeugten, klassifizierten Wetterdaten an dem Beispiel Frühling mit fünf charakteristischen Temperaturverläufen. Wie in der Darstellung zu erkennen ist, sind die äußeren Mittelwerte der Temperaturverläufe zu dem gesamten Mittelwert geschoben. Dies basiert auf der Häufigkeitsverteilung der Temperaturen. Die so ermittelten Klimaverläufe werden in der Simulation hinterlegt und die zu der jeweiligen Startzeit dazugehörigen Verläufe angewandt.

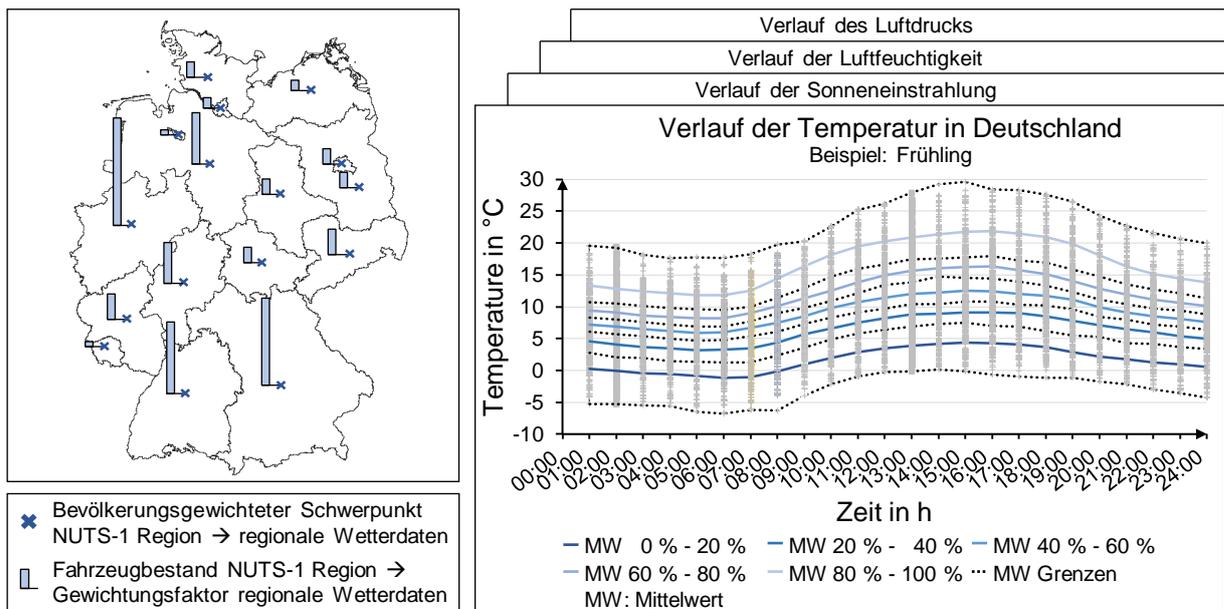


Abbildung 3-11 Methodik für die Gewichtung und für die Einteilung der Wetterdaten nach [108], [112], Daten aus [110], [111]; Deutschlandkarte aus [113]

In der betreuten Studienarbeit [108] wird das erarbeitete Verfahren anhand eines vereinfachten Rechenmodells überprüft, um den Einfluss der Klassifizierung der Wetterbedingungen auf den Energiebedarf der Klimatisierung der Fahrgastzelle zu bewerten. Dazu wird anhand des Beispielslands Deutschland die Heiz- und die Kühllast mittels einer Wärmestrombilanz für alle Tagesverläufe und für die 20 gruppierten Wetterprofile ermittelt und der Energiebedarf der Temperierung der Kabine verglichen. Für die Solltemperatur der Fahrgastzelle werden in diesem Beispiel konstant 22 °C und für die Luftfeuchtigkeit konstant 40 % angenommen. In [108] werden für die Validierung des Energieverbrauchs die drei Szenarien: „Ein Fahrprofil „Pendler“ mit zwei Fahrten pro Tag (vormittags und nachmittags)“, „eine Fahrdauer über den Tag von 08:00 Uhr - 20:00 Uhr“ und „der gesamte Tag“ untersucht. Die Abbildung 3-12 zeigt das Resultat des Vergleichs des Energiebedarfs anhand des Fahrprofils Pendler. Der Darstellung ist zu entnehmen, dass über dem Jahr sowohl der Heiz- als auch der Kühlbedarf hinreichend

genau abgebildet wird. Der über die 365 Wetterverläufe ermittelte Energiebedarf ist in dem Vergleich zu den 20 gruppierten Wetterprofilen etwas niedriger. Die Abweichung beläuft sich bei dem Heizbedarf auf 1,0 % und bei dem Kühlbedarf auf 7,0 %. Dies entspricht einer absoluten Differenz von 3,0 kWh des Heizbedarfs und von 3,5 kWh des Kühlbedarfs. Erstgenannter Bedarf wird in den Jahreszeiten Frühling und Herbst bei der Betrachtung der gruppierten Wetterverläufe unterschätzt, während dieser in den Jahreszeiten Sommer und Winter überschätzt wird. Zweitgenannter Bedarf wird in den Jahreszeiten Frühling und Sommer unterschätzt. Da die Abweichung über einem Jahr jedoch gering ausfällt, wird die Methode als valide erachtet. Neben dem Szenario „Pendler“ werden auch die beiden anderen Betrachtungsszenarien in [108] verglichen. Hierbei zeigt sich eine maximale Abweichung des benötigten Energiebedarfs für die Temperierung der Fahrgastzelle der 365 Wetterverläufe zu den 20 gruppierten Wetterverläufen von 6 %. Auch hier wird das angewandte Vorgehen somit als valide bestätigt.

Vergleich des Heiz- und des Kühlbedarfs der 365 Wetterverläufe zu den 20 gruppierten Wetterverläufen in dem Fahrprofil „Pendler“

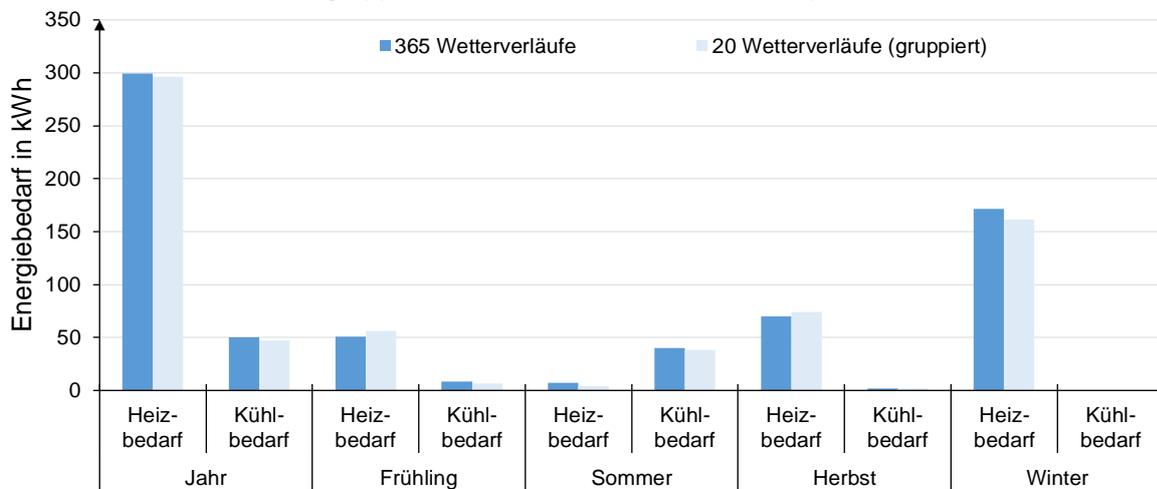


Abbildung 3-12 Vergleich des Heiz- und des Kühlbedarfs der 365 zu den 20 gruppierten Wetterverläufen in dem Fahrprofil „Pendler“ nach [108]

Neben den verschiedenen Wetterverläufen der Jahreszeiten werden drei Startbedingungen festzulegen, um verschiedene Ausgangsszenarien abzubilden. Diese sind „unter freiem Himmel geparkt“, „in dem Schatten geparkt“ und „Vorkonditioniert“. Mit der ersten Ausgangssituation wird der Einfluss der Sonneneinstrahlung und einer damit verbundenen, aufgeheizten Kabine berücksichtigt. Mit dem zweiten Szenario wird eine Parksituation in dem Schatten, ohne Sonneneinstrahlung, repräsentiert. In der letzten Startbedingung wird das Szenario einer bereits anfänglich eingestellten Solltemperatur abgebildet. Mit dem Ziel das erste Ausgangsszenario adäquat abzubilden, wird für jede Segmentklasse ein stehendes Fahrzeug mit den ermittelten Klimarandbedingungen simuliert. Während der Simulation werden die Temperaturverläufe der verschiedenen Massen der Elemente der jeweiligen Fahrgastzellen (Kabinenluft, Einbauten, Scheiben, Dach, Türen, ...) aufgezeichnet. Für die Simulation werden für die Eigenschaften der Fahrgastzellen segmentspezifisch Angaben aus [114] verwendet, vgl. dazu Anhang 6. Die festgestellten Temperaturen der fünf Startzeiten und je 20 Wetterbedingungen werden festgehalten und als Startbedingungen für das Szenario „unter freiem Himmel geparkt“ verwendet. Für die Startbedingung „in dem Schatten geparkt“ werden jene in der Simulation festgestellten Umgebungstemperaturen der jeweiligen Startzeit festgehalten und als Initialwert für diese Betrachtung gesetzt. Damit wird der Einfluss der Sonneneinstrahlung nicht berücksichtigt und ein in dem Schatten geparktes Fahrzeug, beispielsweise eine Parksituation in einer Garage oder in einem Parkhaus, repräsentiert. Ist der Zustand „Vorkonditioniert“ für eine Energiebewertung interessant, wird die Komforttemperatur als initiale Temperatur der Massen der Fahrgastzelle und ggf. auch die Solltemperatur der Massen der Komponenten des Antriebsstrangs, beispielsweise die Starttemperatur der Batterie, eingestellt. Dieses Szenario ist beispielsweise für eine Betrachtung der möglichen Reichweite eines Elektrofahrzeugs in dem Winter interessant.

Zusätzlich zu den verschiedenen Startbedingungen und den 20 Wetterprofilen werden die kältesten 1 % der Wetterverläufe des Winters und die wärmsten 1 % des Sommers ermittelt. Diese dienen der Analyse eines Extrem-Szenarios und der Betrachtung der Sensitivität des Energiebedarfs der verschiedenen Antriebsarten hinsichtlich sehr kalter und sehr warmer Fahrsituationen.

Für eine Berücksichtigung der ermittelten Wetterverläufe und dessen Einfluss auf den gesamtheitlichen Energiebedarf wird eine Gesamtfahrzeugsimulation durchgeführt. Diesbezüglich wird ein modularer Simulationsaufbau genutzt. Dieser wird folgend erläutert.

3.1.4 Modularer Simulationsaufbau

Ein modular aufgebautes Simulationsmodell ermöglicht die Nutzung gleicher Module und schafft Synergieeffekte bei dem Aufbau dieser. Durch die vielen verschiedenen Eingangsparameter der Energiebetrachtung, die drei verschiedenen Fahrzeugklassen und die sechs verschiedenen Antriebsvarianten, ist ein modularer Aufbau des Simulationsmodells essenziell, um die Vielfalt an Varianten gehandhabt zu bekommen. Als Simulationsumgebung wird das Programm GT-SUITE [92] der Firma Gamma Technologies LLC verwendet, da dieses multiphysikalisch aufgebaut ist und teilweise nutzbare Vorlagen, für beispielsweise die Abbildung der Fahrgastzelle, beinhaltet. Der gesamtheitliche Aufbau der Simulationsmodelle wird in die vier Teilbereiche „Fahrzeugarchitektur“, „Antriebsstrang elektrisch und mechanisch“, „Antriebsstrang thermisch“ und „Fahrgastzelle thermisch“ eingeteilt. Diese Untermodule, wie beispielsweise die Fahrgastzelle, werden für unterschiedliche Antriebsvarianten eingesetzt und lediglich einmalig modelliert. Die Abbildung 3-1 zeigt den Aufbau des modularen Simulationsmodells für das Betrachtungsjahr 2015 und dessen Unterteilung in die vier Teilmodelle. Folgend werden die einzelnen Untermodelle und deren Funktion kurz erläutert. Zudem wird in dem 5. Kapitel, in dem jeweiligen Unterpunkt der jeweiligen Variante des jeweiligen Antriebs, die Modellierung detailliert vorgestellt.

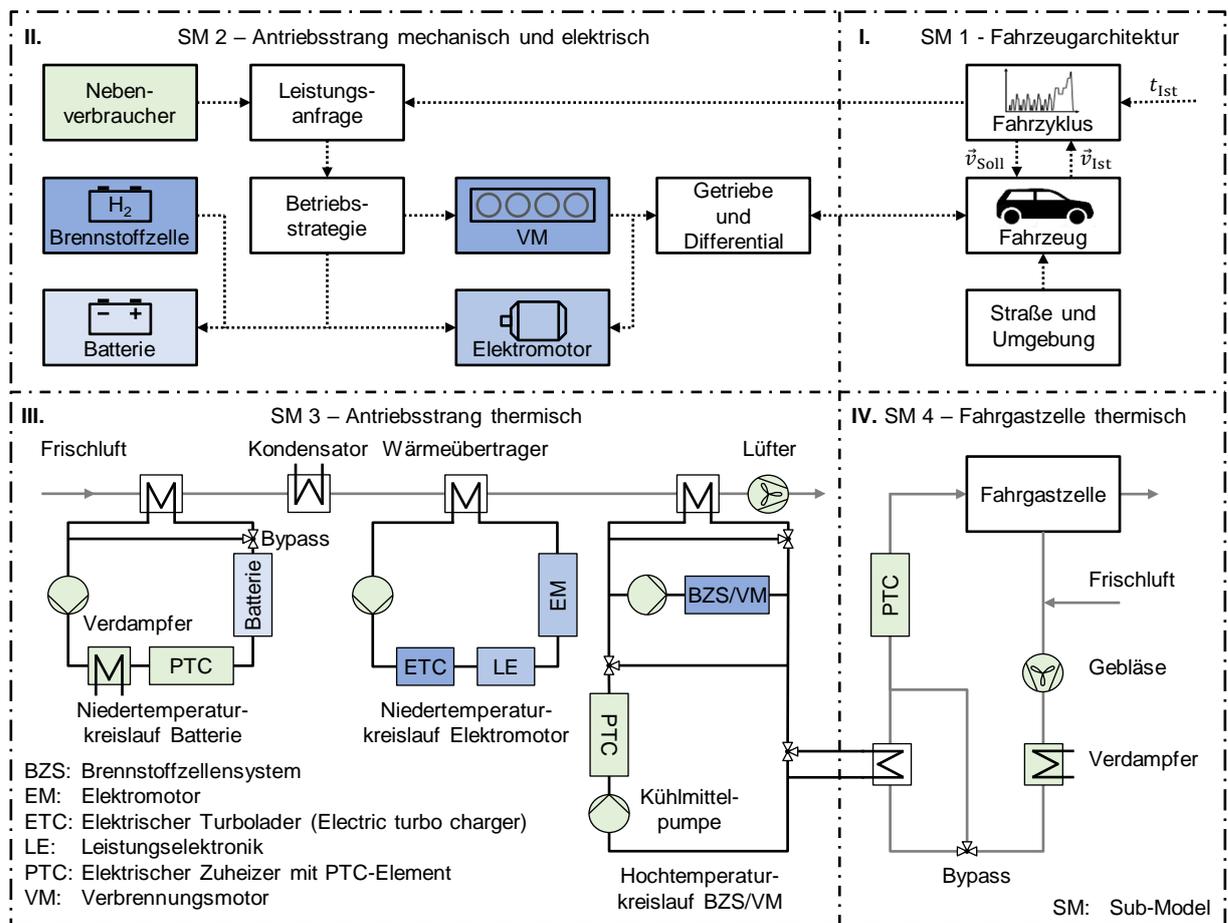


Abbildung 3-13 Modularer Aufbau der Simulationsmodelle 2015 nach [115]

In dem ersten Teilbereich, der Fahrzeugarchitektur, sind der Fahrzyklus, das betrachtete Fahrzeug, die Straßenanbindung und die direkten Umgebungseigenschaften definiert. Das Fahrzeug wird mit den benötigten Eigenschaften für eine Berechnung der Fahrwiderstände parametrisiert. Über ein Fahrprofil wird eine Soll-Geschwindigkeit über der Zeit festgelegt. Mittels eines Vergleichs mit der Ist-Geschwindigkeit wird über einen Regler ein Leistungsbedarf errechnet. Dieser wird in dem zweiten Untermodell verarbeitet. Über die lastabhängigen Wirkungsgrade der Antriebskomponenten wird eine Verlustleistung eruiert, welche diese erwärmt und jenes in dem dritten Bereich dargestellte Thermomanagement des Antriebsstrangs notwendig macht. In diesem werden die Temperaturen der Komponenten kontrolliert und ein sicherer und nachhaltiger Betrieb gewährleistet. Dazu sind unter anderem verschiedene Kühlkreisläufe und der Kühlluftpfad des Fahrzeugs modelliert. In dem vierten Teilbereich wird die Klimatisierung der Fahrgastzelle abgebildet. In dieser wird ein Anteil der Frischluft in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur eingestellt, ein Luftmassenstrom über ein Gebläse geregelt und die Klimatisierungszustände Heizen, Kühlen oder Entfeuchten durch einen Verdampfer, einen Bypass und einen Heizungswärmeübertrager bzw. einen Kondensator (BEV 2025) oder einen elektrischer Luft-PTC realisiert.

3.2 Prognose der Fahrleistungs- und der Fahrwiderstandsentwicklung

Neben den antriebsspezifischen Kenngrößen wird die Entwicklung der geforderten Fahrleistung und der Fahrwiderstände eruiert, um den zukünftigen Energiebedarf unterschiedlicher Antriebsstrangvarianten möglichst realistisch zu prognostizieren. Mit dem Ziel dies umzusetzen, wird, auf historischen Werten basierend, eine Prognose der konventionellen Antriebsleistung, des Luftwiderstandsbeiwerts, der Stirnfläche, des Rollwiderstandsbeiwerts und der Karosseriemasse segmentspezifisch durchgeführt.

3.2.1 Leistung des konventionellen Antriebsstrangs

Für eine Prognose der Entwicklung der Leistung der konventionellen Antriebe erfolgt in einem ersten Schritt eine Betrachtung des historischen Verlaufs der Verkaufszahlen der verschiedenen Fahrzeugklassen und in einem zweiten Schritt eine Prognose der Entwicklung dieser. In einem dritten Schritt werden die durchschnittlichen Leistungen der Fahrzeugklassen des Zeitraums 2003 bis 2015 analysiert und in einem vierten Schritt werden diese fahrzeugklassenspezifisch extrapoliert. In einem fünften und finalen Schritt werden die prognostizierten, durchschnittlichen Leistungen der Fahrzeugklassen mit den entwickelten Verkaufszahlen gewichtet und die Durchschnittsleistung der Referenzsegmente ermittelt.

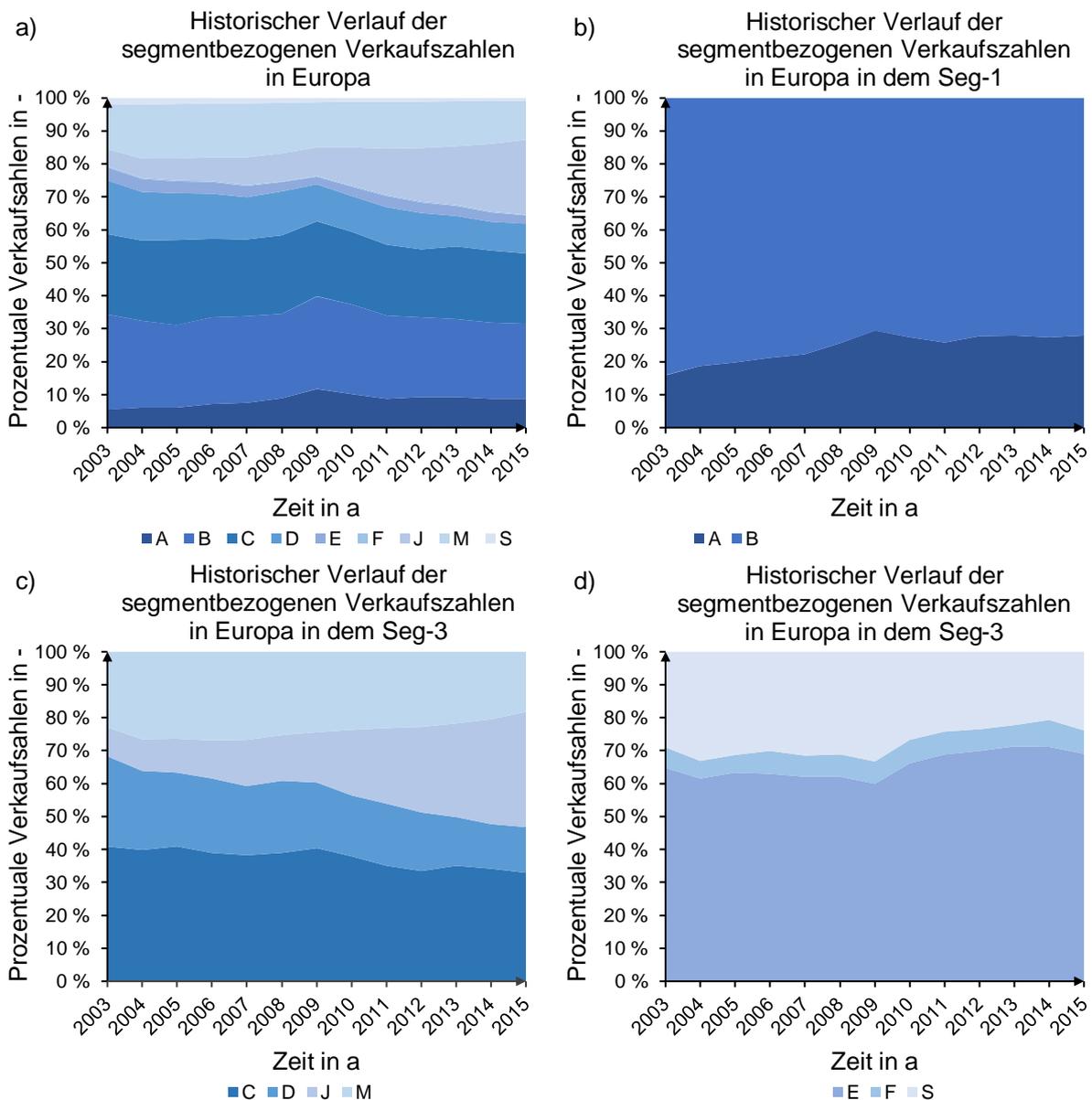


Abbildung 3-14 Historischer Verlauf der segmentbezogenen Verkaufszahlen in Europa a) alle Segmente, b) Segment 1, c) Segment 2 und d) Segment 3, Daten aus [100], Datenstand Jahr 2016

In der Abbildung 3-14 sind die historischen Werte der segmentspezifischen Marktanteile dargestellt. In dem Diagramm a) sind die prozentualen Verkaufszahlen der verschiedenen Fahrzeugklassen an dem gesamten Markt über dem Zeitraum 2003 bis 2015 enthalten. In dem Diagramm b) ist dies analog für das erste Segment und dessen Fahrzeugklassen gegeben und in dem Diagramm c) und d) ist dies für das Segment 2 und für das Segment 3 in gleicher Weise gezeigt. In der gesamtheitlichen Darstellung a) ist zu erkennen, dass der Anteil des Segments 1 in etwa konstant bleibt, jener des Segments 2 sich leicht erhöht und jener des Segments 3 sich etwas verringert. Bei einer detaillierteren Betrachtung des ersten Segments, Diagramm b), zeigt sich, dass der Marktanteil des Segment A steigt, respektive sich dieser für das Segment B reduziert. Der Anteil der Fahrzeugklasse Kleinwagen an dem Segment 1 steigt von ca. 16 % auf ca. 28 % an. Respektive reduziert sich der Anteil für die Fahrzeugklasse Kleinwagen von etwa 84 % auf etwa 72 %. Die historischen Verkaufszahlen des zweiten Segments, Diagramm c), sind vor allem durch eine deutlich gestiegene Zunahme der Verkaufszahlen des Segments J geprägt. Durch den starken Anstieg der prozentualen Verkaufszahlen von etwa 9 % in dem Jahr 2003 auf etwa 35 % in dem Jahr 2015 der Fahrzeugklasse Geländewagen an den Verkaufszahlen des Segments 2 reduzieren sich die relativen Anteile der Segmente C, D und M. Die relativen Verkaufszahlen der Mittelklasse reduzieren sich von 41 % auf 33 %, jene der oberen Mittelklasse von 27 % auf 14 % und jene der Mehrzweckfahrzeuge von 23 % auf 18 %. In dem dritten Segment steigen die prozentualen Verkaufszahlen des Segments E etwas, während jene des Segments S sich geringfügig reduzieren und jene des Segments F etwa konstant bleiben. Der relative Anteil der Oberklasse ändert sich von 65 % auf 69 %, jener der Sportwagen von 29 % auf 24 % und jener der Luxusklasse von 6 % auf 7 %.

Für die Entwicklung der segmentspezifischen Marktanteile werden sowohl historische als auch prognostizierte Angaben der zu der Marktanalyse dienenden Datenbank [100] herangezogen. Die Abbildung 3-15 stellt die darin enthaltenden historischen Daten und die angenommene Entwicklung der relativen Verkaufszahlen der europäischen Fahrzeugsegmente dar.

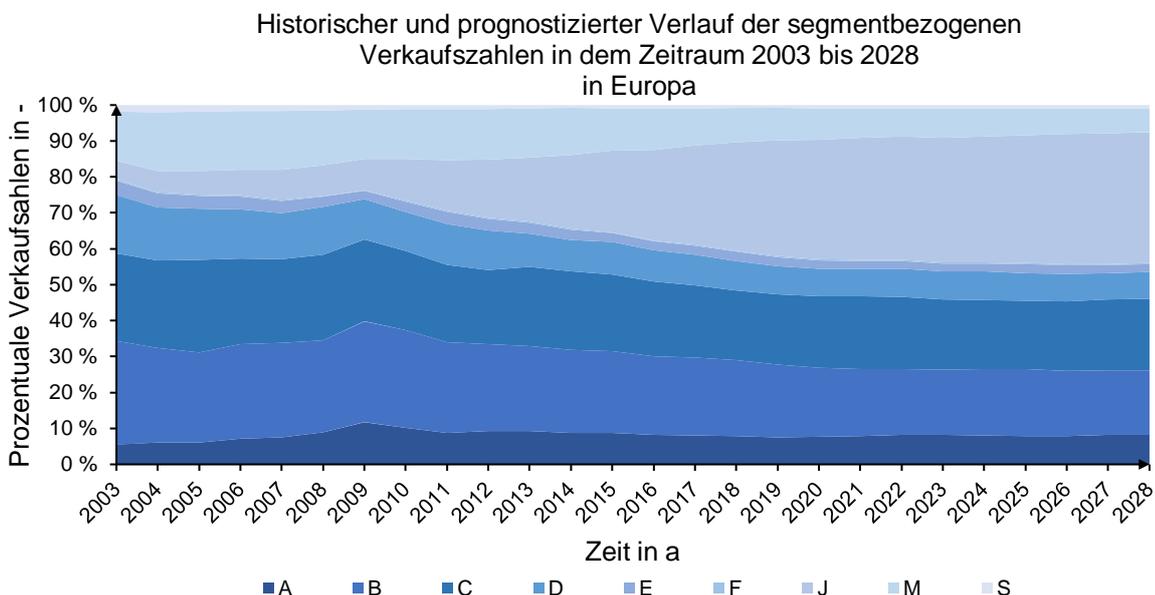


Abbildung 3-15 Historischer und prognostizierter Verlauf der segmentbezogenen Verkaufszahlen in dem Zeitraum 2003 bis 2028 in Europa, Daten aus [100], Datenstand Jahr 2016

Aus der Darstellung der Entwicklung der Verkaufszahlen ist zu entnehmen, dass der relative Anteil des ersten Segments insgesamt um etwa 5 % abnimmt, wobei der Wert der prozentualen Verkaufszahlen der Fahrzeugklasse A, Kleinwagen, in dem Zeitraum 2015 bis 2025 nahezu konstant bleibt. Folglich steigt dessen relativer Anteil in dem Segment klein an, während jener der Fahrzeugklasse B, Kleinwagen, auf 70 % sinkt. Die zweite Fahrzeugklasse der Referenzfahrzeuge, das Segment mittel, steigt in dem Zeitraum 2015 bis 2025 um etwa 5 % an. Der Anstieg der Fahrzeugklasse Geländewagen sticht

dabei heraus. Die relative Verkaufszahl des Segments J, in dem Bezug zu den gesamten Verkaufszahlen des Segments 2, erhöht sich von etwa 35 % in dem Jahr 2015 auf etwa 50 % in dem Jahr 2025. Folglich ist dies die meistverkaufte Fahrzeugklasse in dem zweiten Segment. Die restlichen, relativen Verkaufszahlen der Fahrzeugklassen C, D, und M reduzieren sich von 33 % auf 27 %, von 14 % auf 11 % und von 18 % auf 11 % von dem Jahr 2015 auf das Jahr 2025. Die relativen Verkaufszahlen des dritten Segments in dem Bezug zu den gesamten Verkaufszahlen bleibt von dem Jahr 2015 zu dem Jahr 2025 in etwa konstant und liegt bei ca. 3,6 %. Diese Kontinuität ist für die einzelnen Fahrzeugklassen in dem dritten Segment ebenfalls zutreffend. Auch hier bleiben die relativen Verkaufszahlen der Segmente E, F und S nahezu identisch. Der relative Anteil der Oberklasse ändert sich von 69 % auf 68 %, jener der Luxusklasse von 7 % auf 8 % und jener der Sportwagen bleibt konstant bei 24 %.

Neben der Entwicklung der Verkaufszahlen der einzelnen Fahrzeugklassen wird die historische Entwicklung der durchschnittlichen Leistung dieser untersucht, um diese zu prognostizieren. Die dabei verwendeten, historischen Angaben der Durchschnittsleistungen der Segmente werden aus der Studie [99] entnommen. Die Abbildung 3-16 stellt die festgestellten Werte in vier Diagramme dar.

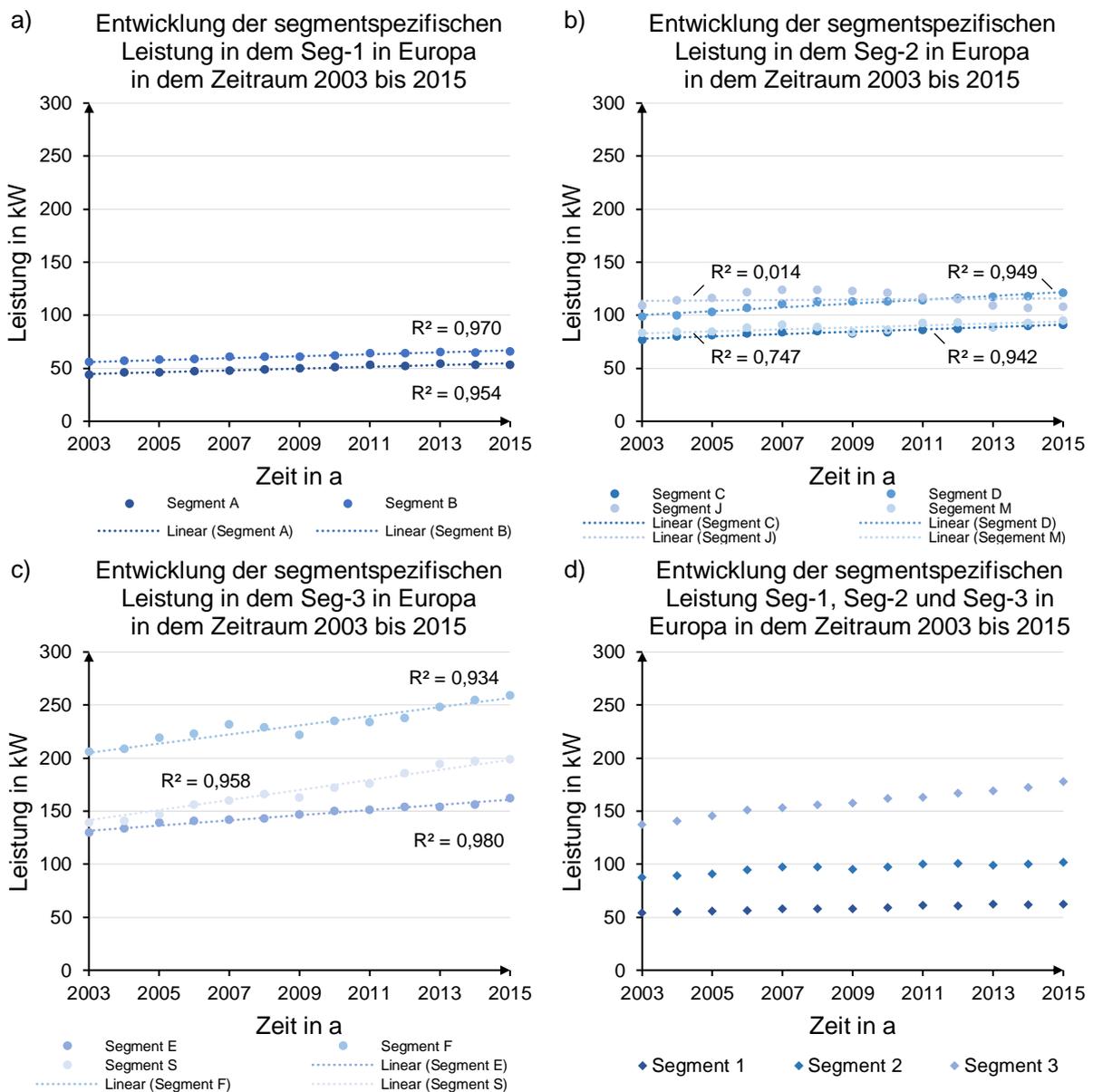


Abbildung 3-16 Entwicklung der segmentspezifischen Leistung a) der Segmente 1, b) der Segmente 2, c) der Segmente 3 und d) der gewichteten Segmente 1 bis 3; Daten aus [99]

Das Diagramm a) stellt die Entwicklung der segmentspezifischen Leistung in dem Segment 1 in dem Zeitraum 2003 bis 2015 dar und die Diagramme b) und c) geben dies für das Segment 2 und das Segment 3 wieder. Das Diagramm d) visualisiert jene, über die Verkaufszahlen gewichtete, Leistung der drei Referenzsegmentklassen. Da der Trend der Entwicklung der Leistung in allen Fahrzeugklassen, bis auf in jener Fahrzeugklasse der Geländewagen, einen steigenden Verlauf abbildet und es sich nicht abzeichnet, dass die Motorisierung reduziert wird, wird für die Entwicklung der Leistung eine lineare Regression als Basis für eine anschließende Extrapolation der Leistungsdaten herangezogen. Für die Fahrzeugklassen A, B, C, D, E, F und S ergeben sich für das Bestimmtheitsmaß R^2 jeweils Werte größer als 0,93, was einer sehr guten Übereinstimmung der Regressionsfunktion mit den Istwerten entspricht. Für die Fahrzeugklasse M ist das Bestimmtheitsmaß R^2 ca. 0,75, was ebenfalls eine gute Approximation der historischen Daten darstellt. Lediglich für das Fahrzeugsegment J ergibt sich ein schlechtes Bestimmtheitsmaß. Trotz des schlechten Bestimmtheitsmaßes wird auch in diesem Segment eine lineare Regression angewandt, da eine weitere, wenn auch eine geringfügige, Leistungserhöhung als plausibel angesehen wird.

Die, über eine anschließende Extrapolation der Regressionsgerade, ermittelte Entwicklung der durchschnittlichen Leistung der Fahrzeugklassen wird mit den prognostizierten, prozentualen Verkaufszahlen der Segmente gewichtet und die durchschnittliche Leistung der Referenzsegmentfahrzeuge für das Prognosejahr 2025 bestimmt. Die Abbildung 3-17 zeigt die sich daraus ergebende Entwicklung der durchschnittlichen Leistung der drei Segmente klein, mittel und groß.

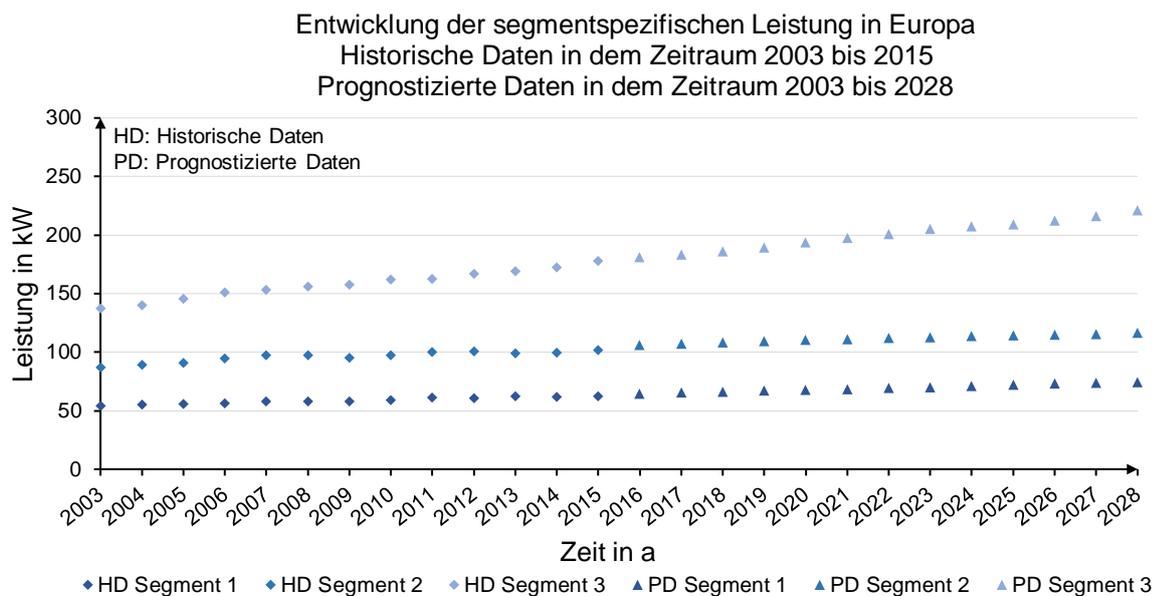


Abbildung 3-17 Entwicklung der segmentspezifischen Leistung in Europa, Daten des Jahres 2003 bis zu dem Jahr 2015 aus [99]

Mit der angewandten Methodik wird für das Prognosejahr 2025 eine Leistung von ca. 72 kW in dem Segment 1, von ca. 114 kW in dem Segment 2 und von ca. 209 kW in dem Segment 3 ermittelt. Dabei ist besonders die Steigerung in dem dritten Segment beachtlich. Da historisch die drei Fahrzeugklassen Oberklasse, Luxusklasse und Sportwagen auch deutliche Erhöhungsraten aufweisen, wird auch diese Entwicklung als plausibel angesehen. Anzumerken ist dennoch, dass die verwendete Methodik auf einer linearen Inter- und einer linearen Extrapolation basiert und somit nur als eine vereinfachte Annahme, welche eine Tendenz widerspiegelt, zu verstehen ist.

Neben der Entwicklung der Leistung der Segmente für das Prognosejahr 2025 werden zusätzlich die Entwicklungen der Fahrwiderstandskennwerte, beispielsweise der c_w -Wert und die Stirnfläche, für eine Auslegung der Fahreigenschaften benötigt. Folgend wird deshalb auf diese eingegangen.

3.2.2 Luftwiderstandsbeiwert und Stirnfläche

Wie in der Gleichung 2-3 auf der Seite 15 gezeigt, setzt sich der Luftwiderstand aus der Luftdichte, dem Luftwiderstandsbeiwert, der Stirnfläche und dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit zusammen. Konstruktiv beeinflussbar sind dabei sowohl der Luftwiderstandsbeiwert als auch die Stirnfläche. Folgend werden deshalb diese beiden Parameter untersucht. Dabei werden analog zu der Referenzfahrzeugbildung die zehn meistverkauften Fahrzeuge je Segment betrachtet. Als Basis der Prognose dienen historische Werte. Dazu werden jene in der Datenbank [38] verfügbaren Luftwiderstandsbeiwerte und Stirnflächen der Top-10-Fahrzeuge ab dem Jahr 2003 aufgenommen und mit den dazugehörigen Verkaufszahlen gewichtet. Zusätzlich erfolgt eine Analyse der wiederholt in den Jahren 2003 bis 2015 in den Top-10 auftretenden Fahrzeugen für die Zeitspanne von 1980 bis 2003. Dabei werden unter anderem Fahrzeugvarianten, wie beispielsweise der VW Golf der Volkswagen AG oder die Mercedes-Benz C-Klasse der Firma Daimler AG, berücksichtigt. Die Gewichtung der Untersegmente erfolgt in dem Zeitraum 2003 bis 2015 nach der tatsächlichen Verteilung der Neuzulassungen. Für die Jahre vor dem Jahr 2003 wird, wenn möglich, das Verhältnis von dem Jahr 2003 angenommen, da davorliegende Marktverteilungen nicht bekannt sind. Ist in der Historie ein neues Segment, wie beispielsweise das Segment SUV, nicht enthalten, wird dessen Anteil in dem Verhältnis der anderen Segmente des Jahres 2003 aufgeteilt. Aufgrund der fehlenden Marktverteilung innerhalb der europäischen Segmente, beispielsweise Segment A, werden die c_w -Werte der Fahrzeuge in dem Untersegment in diesem Zeitraum gleichgewichtet. Die so ermittelten, historischen Segmentwerte dienen aufgrund der fehlenden Marktverteilung nur der Orientierung bzw. der Plausibilisierung. Die Abbildung 3-18 zeigt jene, über diese Methode, ermittelten, segmentspezifischen Entwicklungen für a) die Stirnfläche und für b) den c_w -Wert. Die Angaben vor dem Jahr 2003 sind mit Kreisen gekennzeichnet, nachfolgende und für eine Prognose verwendete Größen mit Rauten.

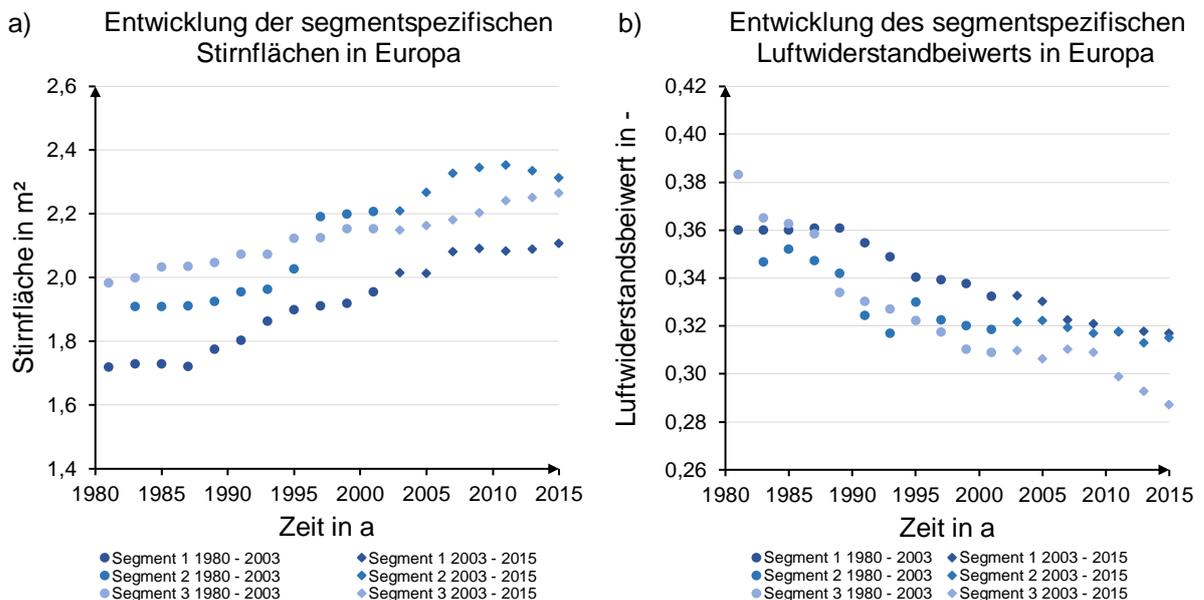


Abbildung 3-18 Entwicklung a) der segmentspezifischen Stirnfläche und b) des segmentspezifischen Luftwiderstandswerts, Daten aus [38]

Bei einer Betrachtung der Entwicklung der Stirnfläche, Abbildung 3-18 a), ist zu erkennen, dass deren anfänglich positive Steigung in dem Segment 1 ab ca. dem Jahr 2007 in etwa konstant, in dem Segment 2 ab ca. dem Jahr 2010 negativ und in dem Segment 3 steigen ist. Historisch betrachtet steigt die Stirnfläche des ersten Segments bis ca. zu dem Jahr 2007 an. Anschließend ist das Wachstum nur noch leicht steigend bzw. nahezu konstant. Der Verlauf des zweiten Segments ist durch einen Anstieg bis etwa zu dem Jahr 2010 geprägt. In den darauffolgenden Jahren findet eine Reduzierung der Stirnfläche statt. Die Stirnfläche des dritten Segments steigt in dem Betrachtungszeitraum kontinuierlich an.

Basierend auf einer konstant bleibenden Stirnfläche in dem ersten Segment und einer, trotz einer Zunahme der SUVs, reduzierenden Fläche in dem zweiten Segment wird für die Prognose der Entwicklung der Stirnfläche für alle drei Segmente vereinfacht angenommen, dass der Grenzwert der Stirnfläche bereits nahezu erreicht ist und diese für das Prognosejahr 2025 jenem Maß aus dem Betrachtungsjahr 2015 entspricht.

Der historische Verlauf des c_w -Werts weist in dem Vergleich zu der Stirnfläche eine anhaltende Reduzierung auf. Die Entwicklung des c_w -Werts wird deshalb folgend detailliert analysiert. Für eine Prognose des Luftwiderstandsbeiwerts wird aufgrund der Verfügbarkeit der Verkaufszahlen die aktuelle Entwicklung ab dem Jahr 2003 berücksichtigt, um anhand der historischen Werte auf zukünftige Veränderungen zu schließen. Zunächst erfolgt für den Luftwiderstandsbeiwert eine Interpolation zwischen den existierenden Kenngrößen, anschließend eine Extrapolation dieser und abschließend eine Analyse der relativen Änderung zu dem Istwert des Jahres 2015. Darauf aufbauend erfolgt, wie bereits bei der Entwicklung der Leistung angewandt, eine Gewichtung der einzelnen Prognosen der Fahrzeugklassen nach der Entwicklung deren Anteil an den Verkaufszahlen des jeweiligen Segments. Aufgrund einer sich verringernden relativen Änderungsrate wird eine Potenzfunktion der Form

$$f(x) = a \cdot (x - t)^c + d \quad (3-1)$$

als Regressionsfunktion gewählt. Durch die enthaltende, abnehmende relative Änderungsrate wird der Effekt abgebildet, dass anfängliche Verbesserungen eine erhöhte Wirkung aufweisen und darauffolgende Anpassungen einen geringeren Einfluss besitzen. Da eine Potenzfunktion mit einem Exponenten c kleiner null für $(x-t)$ -Werte größer null gegen null strebt, werden die c_w -Werte durch eine y -Achsenverschiebung d um einen theoretischen Grenzwert des c_w -Werts verschoben. Hierbei wird der Wert 0,15 als Limes gewählt, welcher unter anderem nach [24] als mögliches Minimum für einen Pkw-Luftwiderstandsbeiwert angenommen wird. Zudem erfolgt mit einer Konstanten t eine Verschiebung des Graphs nach rechts bzw. nach links. Dies dient der Anpassung des Startjahrs der Entwicklung. Zudem wird mit dem Multiplikator a die Steigung der Funktion beeinflusst. Die Abbildung 3-19 a), b) und c) enthält die ermittelten Regressionsfunktionen der Luftwiderstandsbeiwerte der verschiedenen Fahrzeugklassen und deren Bestimmtheitsmaß R^2 . In dem Diagramm a) sind die Werte für das Segment 1, in dem Diagramm b) jene des Segments 2 und in dem Diagramm c) jene des Segments 3 dargestellt. Die festgestellten Bestimmtheitsmaße sind, bis auf jene der Fahrzeugklassen C, S und F, ausreichend hoch. Die Bestimmtheitsmaße sind jeweils größer als 0,80. Die Fahrzeugklassen mit einem niedrigen Bestimmtheitsmaß weisen über den Betrachtungszeitraum eine reduzierte Änderungsrate auf. Das geringe Bestimmtheitsmaß wird darauf basierend akzeptiert.

Über einer Extrapolation, der über diese Methode bestimmten, segmentspezifischen Regressionsfunktionen, wird die Entwicklung der segmentspezifischen Luftwiderstandswerte prognostiziert. Da die Regressionswerte des Betrachtungsjahrs 2015 nicht exakt die IST-Werte des Jahres 2015 abbilden, wird ein Verhältnis der ermittelten Regressionswerte nach dem Jahr 2015 zu dem Regressionswert des Jahres 2015 gebildet und mit dem realen Luftwiderstandsbeiwert des Betrachtungsjahrs 2015 multipliziert. Durch dieses Vorgehen wird eine, durch die Regression ermittelte, prozentuale Änderungsrate auf den tatsächlichen Wert des Betrachtungsjahrs 2015 angewandt. Final werden die segmentspezifischen Werte mit den prognostizierten Marktverteilungen aus der Abbildung 3-15 auf der Seite 68 gewichtet und die c_w -Werte der Segmente 1 bis 3, wie in der Abbildung 3-19 d) gezeigt, prognostiziert. Für das Prognosejahr 2025 ergeben sich durch die angewandte Methodik einer Reduzierung des c_w -Werts in dem Zeitraum 2015 bis 2025 von 3,2 % in dem ersten Segment, 2,1 % in dem zweiten Segment und 3,6 % in dem dritten Segment. Auch hier ist anzumerken, dass es sich bei den, über eine Inter- und eine Extrapolation, ermittelten Werten um Annahmen handelt.

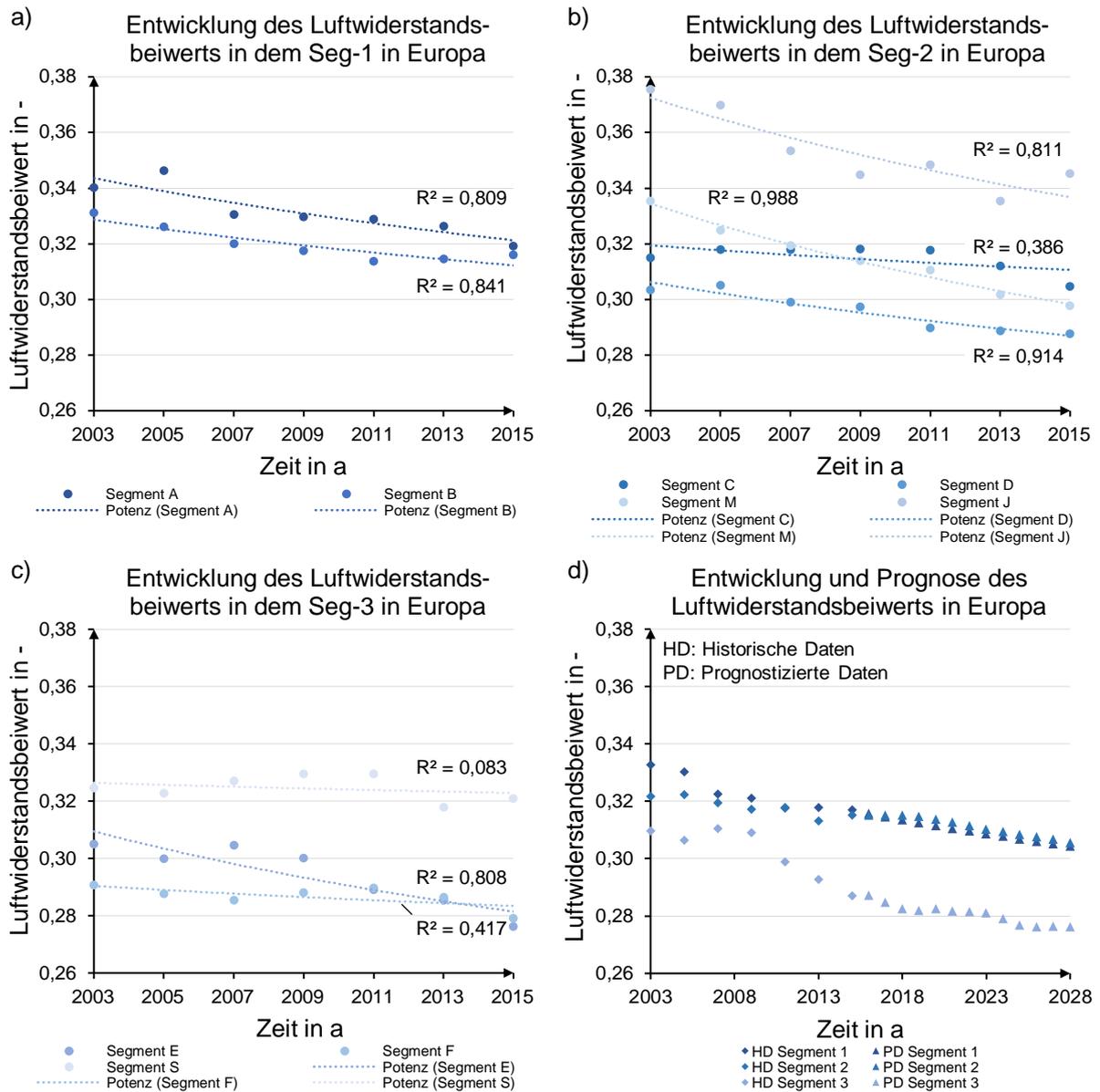


Abbildung 3-19 Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts a) in dem Segment 1, b) in dem Segment 2, c) in dem Segment 3 und d) für die Segmente 1 bis 3, Daten aus [38], Top-10-Fahrzeuge je Segment verwendet

3.2.3 Rollwiderstandsbeiwert

Für eine Prognose der Entwicklung des Rollwiderstandsbeiwerts werden die Angaben des Rollwiderstandswertes über der Zeit aus den Quellen [116] und [117] herangezogen. Wie in der Abbildung 3-20 dargestellt, hat sich der dimensionslose Rollwiderstandsbeiwert in dem Zeitraum 1890 bis 2015 von ca. 30 ‰ auf etwa 6 ‰ reduziert. Zudem wird prognostiziert, dass noch ein weiteres Potenzial vorhanden und in dem Jahr 2030 ein Rollwiderstandsbeiwert von ca. 4 ‰ erreichbar ist [36]. Da bereits heute mit Spezialreifen für Verbrauchswettfahrten noch niedrigere Koeffizienten von ca. 1 ‰ erreicht werden, werden die gezeigten Zukunftswerte als realistisch eingestuft [35], [116]. Für eine Verifizierung des aktuellen Rollwiderstandsbeiwerts wird zudem das EU-Reifenlabel herangezogen. Dieses ist seit dem Jahr 2012 durch die Verordnungen 1222/2009 [118] und die Verordnung 661/2009 [119] eingeführt und beinhaltet die Effizienzklassen A - G für Pkw-Reifen. In der effizientesten Klasse, Klasse A, unterschreitet der Rollwiderstandsbeiwert den Wert 6,5 ‰. Damit wird jener für das Betrachtungsjahr 2015 ermittelte Wert von ca. 6,2 ‰ als realistisch eingeschätzt. Wie bereits für den Luftwiderstand angewandt,

wird eine Potenzfunktion zur Interpolation herangezogen, um den Beiwert für das Prognosejahr 2025 abzuschätzen. Die Abbildung 3-20 stellt den Verlauf der Regressionsfunktion dar. Über diese ergibt sich ein Prognosewert von ca. 5,5 ‰ für das Prognosejahr 2025 bei einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,952.

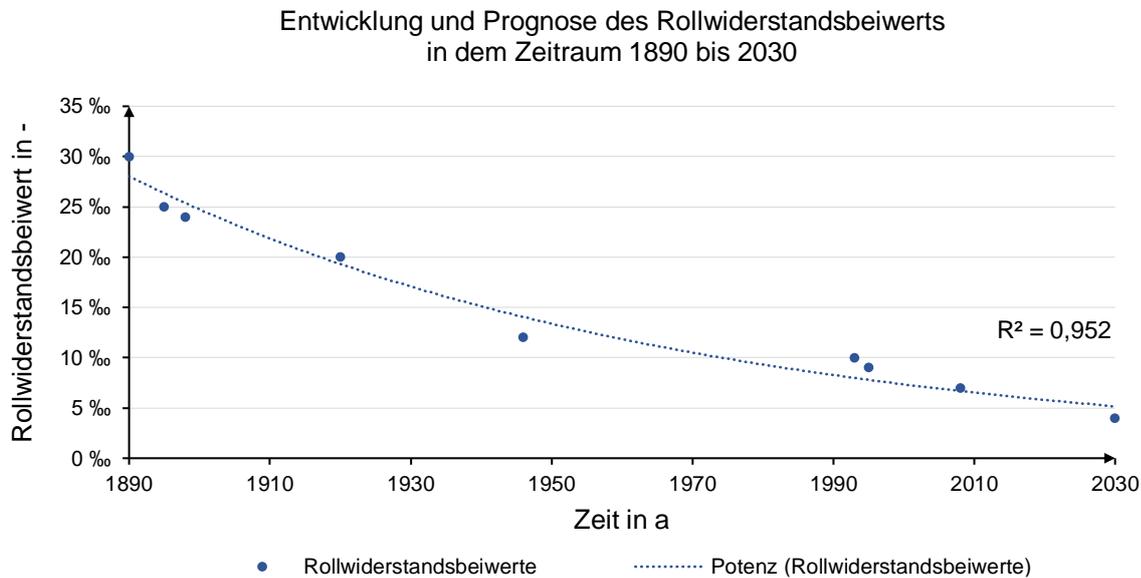


Abbildung 3-20 Historische Entwicklung und Prognose des Rollwiderstandsbeiwerts, Daten auf [35], [36]

Basierend auf einem Ansatz eines fairen Vergleichs wird für alle Antriebsstrangvarianten ein identischer Rollwiderstandsbeiwert verwendet. Da besonders bei Elektrofahrzeugen überwiegend Leichtlaufreifen verbaut sind, werden, analog zu der geplanten Tank-to-Wheel-Studie der JEC [74], für das Betrachtungsjahr 2015 7 ‰ und für das Prognosejahr 2025 5 ‰ als Rollwiderstandsbeiwert definiert. Bei den festgelegten Werten handelt es sich somit um niedrige, aber realistische Annahmen.

3.2.4 Karosseriemasse

Trotz einer, in der Abbildung 3-16 auf der Seite 69 gezeigten, Steigerung der Leistung der Pkws und einem Trend zu SUVs, vgl. Abbildung 3-14 auf der Seite 67, ist die Fahrzeugmasse der gruppierten Segmente, wie in der Abbildung 3-21 visualisiert, nur marginal gestiegen. Die festgestellte, geringe Zunahme kann mit Leichtbaumaßnahmen, welche unter anderem eine Materialvielfalt aufgrund eines bedarfsgerechten Einsatzes nutzen und so zu einer Massenreduzierung beitragen, erklärt werden.

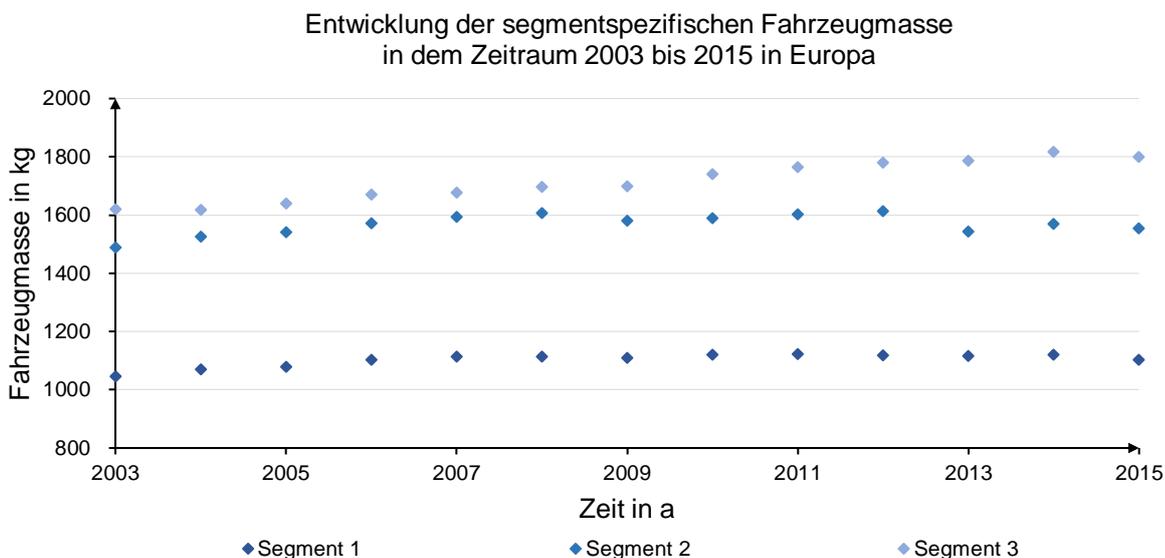


Abbildung 3-21 Entwicklung der segmentspezifischen Fahrzeugmasse 2003 bis 2015, Daten aus [99]

Die weitere Entwicklung der Karosseriemasse wird prognostiziert, um den angewandten und den zukünftigen Leichtbaumaßnahmen segmentspezifisch gerecht zu werden. Für eine Prognose der Karosseriemasse wird, jenes, in verschiedene Segmente unterteilte, Potenzial nach [120] und die Entwicklungsmöglichkeit in dem C-Segment nach dem vorläufigen Stand des „Tank-to-Wheel-Reports v5“ [74] der JEC verwendet. Für die Zeitspanne von dem Betrachtungsjahr 2015 bis zu dem Prognosejahr 2025 wird konservativ angenommen, dass jeweils die angegebene, niedrigere Reduzierung der Karosseriemasse umgesetzt ist. Die Tabelle 3-7 listet die Daten aus den Quellen auf. Für das kleine Segment wird eine Reduzierung der Karosseriemasse um 30 kg, für das mittlere Segment um 80 kg und für das größte Segment um 150 kg prognostiziert.

Tabelle 3-7 Segmentspezifische, potenzielle Masseneinsparung nach [74] und [120]

Segment	Masseneinsparung			Quelle
	Minimal	Maximal	Durchschnitt	
	kg	kg	kg	
A, B	30	40	35	[120]
C	80	100	90	
D, E	150	300	225	
S, Luxus	Extreme Werte		-	
C-Segment	86	95	90,5	[74]

Neben den Leichtbaumaßnahmen wird bei der Karosseriemasse zudem berücksichtigt, ob die jeweilige Antriebsvariante, aufgrund ihres Aufbaus, einen verstärkten Unterboden benötigt. Für das Betrachtungsjahr 2015 wird dabei angenommen, dass sowohl die Brennstoffzellenvarianten als auch das Batteriefahrzeug eine verstärkte Tragstruktur besitzen. Analog der Quelle [121] wird für die benötigte Fläche des Batterie- bzw. des Brennstoffzellensystems ein 1,5 mm starkes Stahlblech verwendet, um diesen, zusätzlichen Aufbau zu berücksichtigen. Für das Prognosejahr 2025 wird, wie bereits bei dem Mercedes-Benz GLC F-CELL der Firma Daimler AG umgesetzt [122], angenommen, dass das Brennstoffzellenmodul in dem konventionellen Motorraum untergebracht und ein verstärkter Unterboden nicht mehr benötigt wird.

Für eine bedarfsgerechte Auslegung der Antriebe muss neben den Fahrwiderständen die spezifische Masse der Komponenten für die Jahre 2015 und 2025 bekannt sein. Diesbezüglich wird in dem nächsten Kapitel eine Herleitung der angewandten Entwicklung der spezifischen Komponentenmassen und deren Skalierbarkeit beschrieben.

3.3 Prognose der Komponentenmassen und der Komponentenentwicklung

In diesem Unterkapitel wird auf die Entwicklung der verbauten Komponentensysteme der Batterie, der Brennstoffzelle und der elektrischen Antriebseinheit eingegangen. Dabei wird in dem Folgenden gezeigt, wie die Komponenteneigenschaften für das Betrachtungsjahr 2015 und das Prognosejahr 2025 bestimmt werden. Zudem wird die Leistungsdichte des Verbrennungsmotors analysiert und die Ermittlung sonstiger Massen gezeigt.

3.3.1 Batteriesystem

Mit dem Ziel die Energiedichte eines Batteriesystems adäquat zu prognostizieren, erfolgt zunächst eine Differenzierung des Einsatzzwecks und folglich der Batteriekapazität und des Batterietyps (Leistungs- oder Energiebatterie). Darauf basierend wird zwischen einer Batterie für den Einsatz in einem Hybrid- (HEV), in einem Plug-In- (PHEV) oder in einem Range-Extender- (REEV) bzw. in einem Batteriefahrzeug (BEV) unterschieden. Wie in der Abbildung 2-10 auf der Seite 21 detailliert gezeigt und in der Abbildung 3-22 d) vereinfacht dargestellt, besteht ein Batteriesystem neben den Zellen aus weiteren, für die Funktion essenziellen, Bauteilen. Für eine Dimensionierung eines Gesamtsystems ist vor allem die geforderte Batteriekapazität und die geforderte Leistung bestimmend. Viele Anbauten, wie beispielsweise das Gehäuse, die Kühleranbindung oder die Abdeckung, skalieren annähernd linear mit diesen.

Da somit für die Komponentenentwicklung vor allem der Energieinhalt der Zellen ausschlaggebend ist, wird dieser detailliert untersucht. Für eine Analyse der Entwicklung der Energiedichte wird die, in dem Kapitel 3.2.2 vorgestellte, Methode der Regression mittels einer Potenzfunktion nach der Gleichung 3-1 angewandt und eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Wie in der Abbildung 3-22 a), b) und c) zu sehen, werden damit Bestimmtheitsmaße R^2 von 0,660 bis 0,826 erreicht. Die ermittelten reziproken Energiedichten für das Betrachtungsjahr 2015 und für das Prognosejahr 2025 liegen in dem Vergleich zu den Publikationen [123]–[132] methodenbedingt zwischen optimistischen und zwischen pessimistischen Angaben und können folglich als plausibel angesehen werden. Für das Betrachtungsjahr 2015 bzw. für das Prognosejahr 2025 werden Energiedichten für eine BEV-/REEV-Zelle von 184 Wh/kg bzw. von 250 Wh/kg, für eine PHEV-Zelle von 135 Wh/kg bzw. von 186 Wh/kg und für eine HEV-Zelle von 99 Wh/kg bzw. von 127 Wh/kg festgestellt.

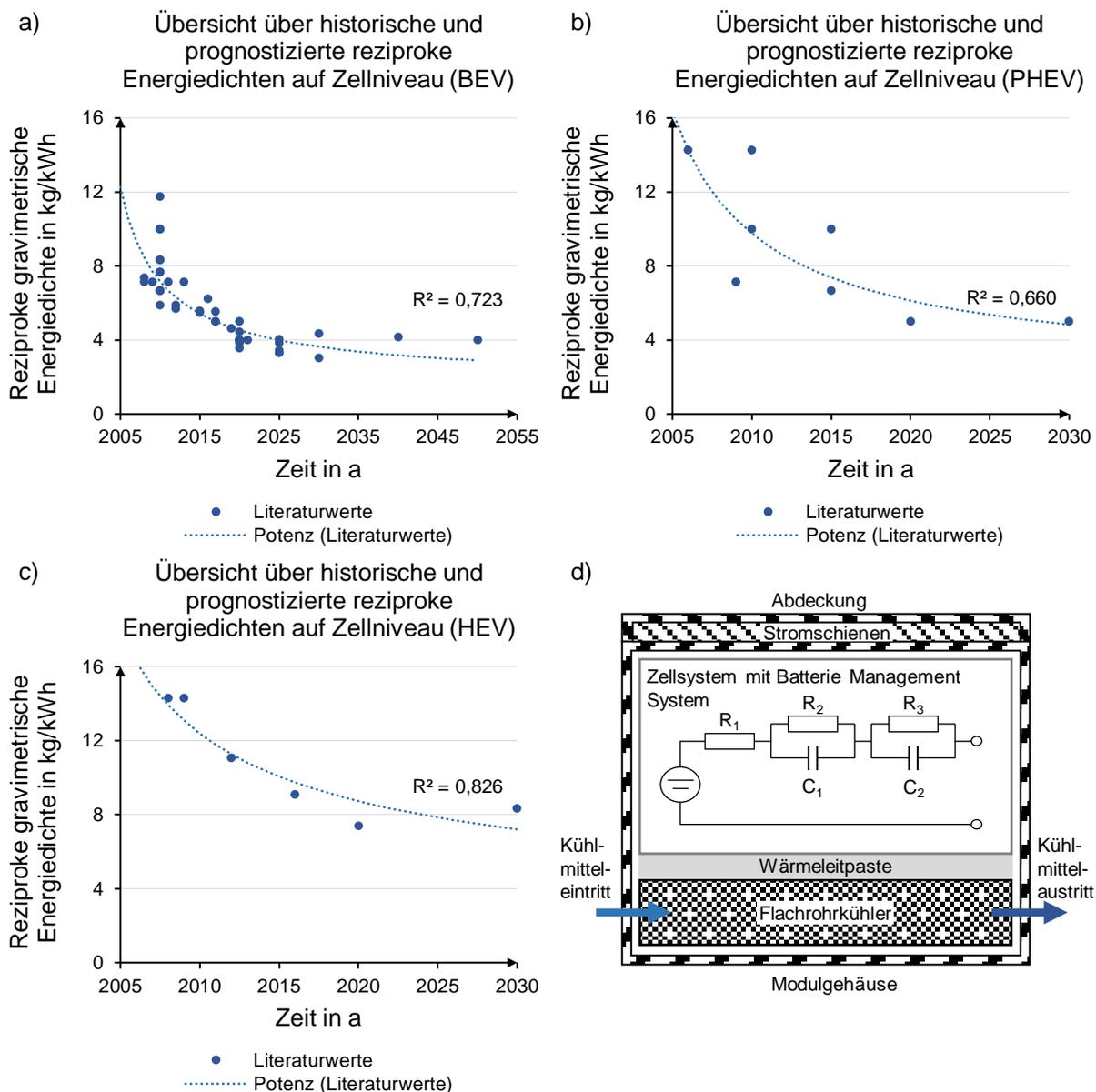


Abbildung 3-22 Übersicht über historische und prognostizierte reziproke Energiedichten auf Zellniveau a) BEV-, b) PHEV-, c) HEV-Zelle und d) vereinfachter Aufbau eines Batteriesystems nach [70], Daten aus [123]–[132]

Mit den berechneten Energiedichten der Zellen erfolgt eine Auslegung des Batteriesystems. Dies findet, wie in der vorgestellten Methodik erklärt, durch ein iterativ arbeitendes Auslegungstool statt. Der Aufbau

des jeweils benötigten Batteriesystems erfolgt dabei nach der folgend beschriebenen Methodik und wird anhand der Abbildung 3-23 beschrieben. Zunächst wird über die Spurweite und über den Radstand der Referenzfahrzeuge, über einen definierten Abstand zu den Achsen und über einer notwendigen Crashstruktur der maximal mögliche Bauraum der Fahrzeugklasse definiert. Anschließend wird über die verfügbare Breite des Bauraums die maximale Kapazität eines quer eingebauten Batteriemoduls festgelegt. Über die Geometrie der Zellen, jener der Wärmeleiter und über die Wanddicke des Gehäuses wird die maximal mögliche Zellanzahl des Moduls berechnet und die maximale Modulkapazität ermittelt. Mit der so definierten Modulgeometrie werden zunächst zwei Module unter der Rücksitzbank gefüllt, vgl. Abbildung 3-23 b) Ziffer 1 und Ziffer 2. Anschließend werden, basierend auf dem Ansatz möglichst vieler Gleichteile, zwei baugleiche Module längs eingebaut, vgl. Abbildung 3-23 b) Ziffer 3 und Ziffer 4. Sollte die benötigte Kapazität nicht ausreichend sein, werden zwei zusätzliche, kürzere Module längs verbaut, vgl. Abbildung 3-23 b) Ziffer 5 und Ziffer 6.

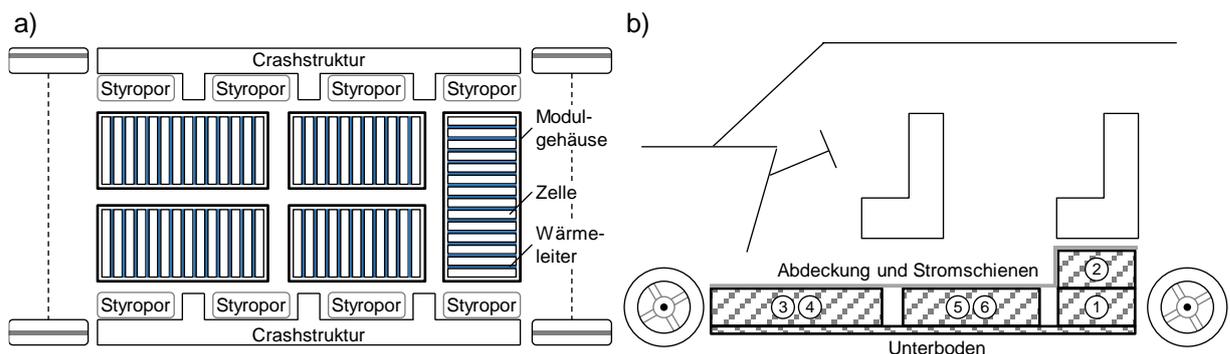


Abbildung 3-23 Modularer Aufbau des Batteriesystems a) Draufsicht und b) Seitenansicht

Ergibt sich aus der benötigten Kapazität eine Zellanzahl, welche ein Modul komplett und eines nur teilweise füllt, wird die Zellanzahl aufgeteilt und zwei einheitliche, baugleiche Modulgrößen, aufgrund des Strebens nach Gleichteilen, verbaut. Über die iterativ berechnete Batteriekapazität, aus dem iterativ arbeitenden Auslegungstool, wird die benötigte Zellanzahl bestimmt, welche wiederum den Aufbau der Module definiert. Mit den verbauten Modulen werden zudem die Abdeckung, der verstärkte Unterboden, die Crashstruktur, die elektrischen Komponenten, die Kühler und die Wärmeleitpaste der Geometrie angepasst. Somit wird das Batteriesystem in Abhängigkeit der Zellgeometrie, welche durch einen Fachbereich der Firma Deutsche Accumotive GmbH [133] für eine REEV-/BEV-, für eine PHEV- und für eine HEV-Zelle zu der Verfügung gestellt wird, bedarfsgerecht und zelltypabhängig aufgebaut und eine realitätsnahe Batteriesystemmasse berücksichtigt.

Die ermittelte, gesteigerte Energiedichte der Zellen resultiert vor allem aus dem Einsatz einer geänderten Zellchemie. Für das Prognosejahr 2025 wird davon ausgegangen, dass weiterhin die Lithium-Ionen-Technologie den Batteriemarkt dominiert und erst in den darauffolgenden Jahren ein möglicher Wechsel zu Lithium-Schwefel oder zu Lithium-Luft stattfindet. In dieser Arbeit wird angenommen, dass ein Umstieg von der aktuell oft verwendeten Li-NMC³⁷-111 zu einer Ni-Rich-Technologie, beispielsweise Li-NMC-811, stattfindet. Die Studie [134] unterstützt diese Annahmen. Mit dem Ziel in einer Simulation die damit verbundenen Änderungen der elektro-chemischen Eigenschaften plausibel abzubilden, werden die Innenwiderstände der beiden Batteriezellchemien unter Laborbedingungen durch [133] ermittelt und eine relative Änderung ladezustands- und stromabhängig aufgenommen. Unter der Annahme, dass das zeitabhängige Verhalten ähnlich ist, dient das ermittelte, relative Verhältnis des Innenwiderstands in dem Folgenden als Skalierungsfaktor. Diese Vereinfachung ermöglicht es, das Zellverhalten für das Prognosejahr 2025 simplifiziert abzubilden. Der Zusammenhang

$$R_{i,2025} = S \cdot R_{i,2015} \quad (3-2)$$

³⁷ Li-NMC steht für die Zellchemie mit Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide.

zeigt die beschriebene und angewandte Widerstandsberechnung. Wobei S ein Skalierungsfaktor und $R_{i,20xx}$ der Innenwiderstand für das Betrachtungsjahr 2015 bzw. für das Prognosejahr 2025 ist.

Da die durchgeführte Widerstandsmessung unter Laborbedingungen, bei nur einer Temperatur, auf Zellebene und ohne Berücksichtigung von weiteren Einflussfaktoren, wie beispielsweise einem Elektrodenbalancing, stattfand, können sich bei hohen Strömen und folglich erhöhten Temperaturen oder bei niedrigen Temperaturen Abweichungen der Innenwiderstände ergeben. Diese Effekte werden aufgrund einer unzureichenden Datenlage nicht detaillierter berücksichtigt. Das Verhalten wird diesbezüglich analog der ausgemessenen Li-NMC-111-Zelle abgebildet.

3.3.2 Brennstoffzellensystem

Für eine Prognose eines Brennstoffzellensystems wird zunächst geklärt, welche Komponenten zu diesem gehören. In der SAE-Richtlinie J2615 [135] ist diesbezüglich definiert, dass eine Kraftstoffverarbeitungseinheit (Brennstoffzellenstack), eine Luftverarbeitungseinheit (beispielsweise ein elektrischer Turbolader), ein thermisches Management (Kühlkreislauf), eine Leistungsverteilungseinheit und ein Kontrollsystem Teile des Brennstoffzellensystems sind. Somit wird ein Wasserstofftanksystem in einem Brennstoffzellensystem nicht berücksichtigt. Für eine Ermittlung der Leistungsdichte eines Brennstoffzellensystems in Abhängigkeit der Systemgröße wird angenommen, dass die Massen des Kühlkreislaufs und des Kontrollsystems annähernd konstant sind. Dies wird damit begründet, dass einige Bauteile, unter anderem viele Rohrleitungen und die Anbindung des Systems an die Tragstruktur, von dem Einbau in das Fahrzeug abhängig sind und nicht bzw. nur geringfügig mit der Leistung skalieren. Für die Berechnung einer somit als konstant angenommenen Masse der Balance of Plant³⁸ (BoP), wird sowohl eine Brennstoffzellensystemmasse als auch eine Masse eines Brennstoffzellenstacks, eines Luftsystems, eines Befeuchters und eines DC/DC-Wandlers für ein 80-kW-System in dem Betrachtungsjahr 2015 ermittelt. Über die Differenz der Masse des Gesamtsystems zu der Summe der Massen der beschriebenen Komponenten wird die BoP bestimmt. Dabei ergibt sich eine BoP-Masse von 66,2 kg. Dieser Wert wird folgend für alle Brennstoffzellensysteme verwendet. Über eine Skalierung der verbleibenden, leistungsabhängigen Komponenten wird eine Berechnung der Masse des Systems leistungsspezifisch realisiert. Die dafür verwendeten Stackmassen für das Betrachtungsjahr 2015 und für das Prognosejahr 2025 werden aus einer Regression ermittelt. Dazu wird eine Potenzfunktion analog der Gleichung 3-1 auf der Seite 72 verwendet. Die sich aus den Literaturwerten aus [4], [6]–[8], [57], [123], [129], [136]–[151] ergebende Regressionsfunktion ist in der Abbildung 3-24 b) gepunktet dargestellt. Diese repräsentiert die Werte der reziproken, gravimetrischen Leistungsdichte mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,885. Die leistungsabhängige Masse der Luftversorgung und jene des Befeuchters für ein 80-kW-Brennstoffzellensystem in dem Jahr 2015 entstammen der Studie [136] des Departments of Energy (DOE), während für die Leistungsdichte des DC/DC-Wandlers Werte aus [148] herangezogen werden. Mit den leistungsabhängigen Komponenten (Brennstoffzellenstack, Luftversorgung, Befeuchter und DC/DC-Wandler) und der konstanten Masse des restlichen Aufbaus, BoP, wird für jede Systemleistung die Masse des Brennstoffzellensystems ermittelt. Diese Vorgehensweise ist notwendig, da jene, in der Abbildung 3-24 a) gezeigte, Entwicklung der Leistungsdichte des Brennstoffzellensystems auf einer typischen Leistungsgröße für ein Fahrzeug der Mittelklasse beruht und diese nicht leistungssensitiv ist. Da das DOE für die Luftversorgung und für den Befeuchter nur zwei Leistungsdichten für die Stützjahre 2015 und 2020 angibt, wird für die Luftversorgung für das Jahr 2015 der Wert von dem Jahr 2015 und für das Jahr 2025 der Wert von dem Jahr 2020 als Basis der Leistungsskalierung verwendet. Für den Befeuchter wird für beide Betrachtungsjahre der Wert des Jahrs 2020 angenommen, da dieser trotz einer Weiterentwicklung eine schlechtere Leistungsdichte aufzeigt. Die Angabe für das Jahr 2020 wird zudem in einer früher veröffentlichten Quelle des DOEs für eine Betrachtung eines früheren Jahrs verwendet. Ferner wird der Wert mit Angaben einer Fachabteilung der Firma Daimler AG verglichen und als plausibel eingeschätzt. Mit dem Ziel die beschriebene Vorgehensweise

³⁸ Balance of Plant ist ein Begriff aus der Energietechnik und bezeichnet unterstützende Komponenten und Hilfssystem eines Kraftwerkes. Im Kontext des Brennstoffzellensystems zählen zur BoP beispielsweise notwendige Pumpen, Medienleitungen und Kühler.

für eine Ermittlung der leistungsabhängigen Brennstoffzellensystemmasse zu plausibilisieren, wird ein Vergleich mit einem bestehenden Aufbau der Firma Daimler AG durchgeführt. Dabei wird eine Abweichung von lediglich 7,2 % festgestellt. Die durch diese Methode ermittelte, geringe Diskrepanz wird als akzeptabel eingestuft, da die Differenz der einzelnen Komponenten gering ausfällt und der größte Massenunterschied aufgrund eines individuellen Designs des realen Aufbaus erklärbar ist.

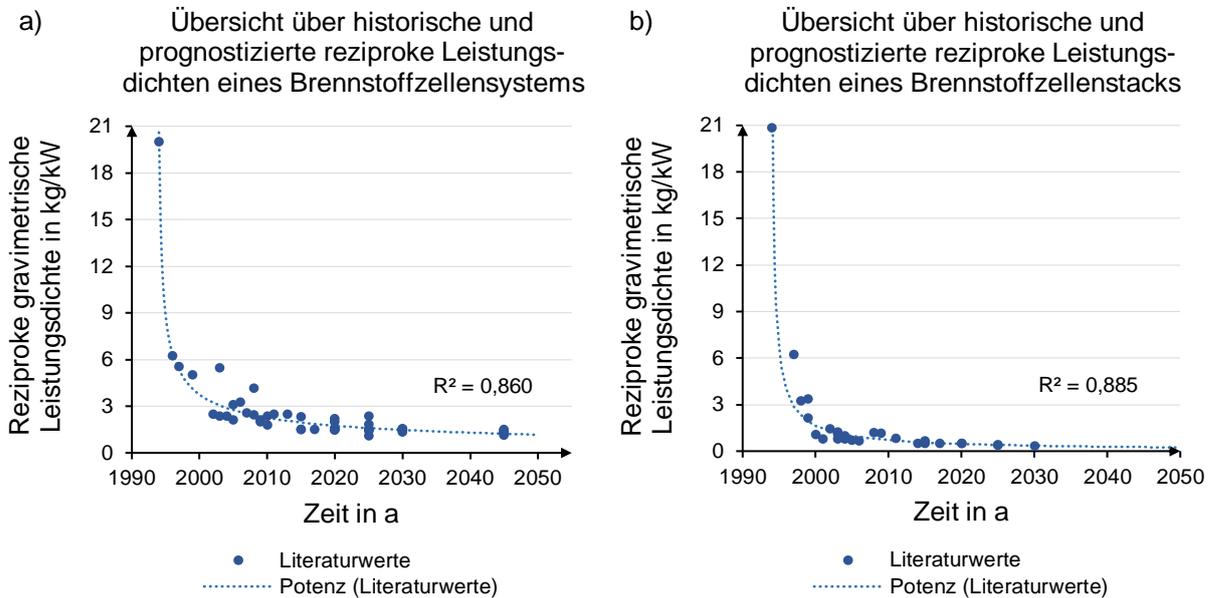


Abbildung 3-24 Übersicht über historische und prognostizierte reziproke Leistungsdichten a) eines Brennstoffzellensystems und b) eines Brennstoffzellenstacks, Daten aus [4], [6]–[8], [57], [123], [129], [136]–[151]

Für die Entwicklung der Systemeffizienz des Brennstoffzellensystems wird angenommen, dass diese in dem Zeitraum 2015 bis 2025 konstant bleibt. Diese Annahme beruht auf einer bereits sehr hohen Effizienz und einer Fokussierung auf einer Reduktion der Kosten.

3.3.3 Wasserstofftanksystem

Für eine Entwicklung der Energiedichte eines Wasserstofftanksystems wird ebenfalls eine Literaturrecherche durchgeführt. Dabei werden die Angaben der Quellen [6], [123], [129], [139], [142], [145], [150], [152]–[159] verwendet. Die dabei enthaltenen Energiedichten werden auf Plausibilität geprüft und der Aufbau der Tanksysteme verglichen. In diesem Zusammenhang wird festgestellt, dass das verbaute Tanksystem des Toyota Mirais der Firma Toyota Motor Corporation keine Tankrahmenstruktur besitzt und die Tanks mit einem Gurtsystem gesichert sind [150]. Da eine Tankrahmenstruktur normalerweise einer Crashesicherheit dient, wird angenommen, dass bei dem verbauten Tanksystem die Rahmenstruktur anderorts verstärkt werden muss. Zudem wird die angegebene gravimetrische Energiedichte der Quelle [143] für das Jahr 2012 als zu hoch eingestuft, da vor diesem Zeitpunkt bereits Tanksysteme mit deutlich niedrigeren Massendichten (Faktor 1,5) aufgebaut wurden und die Angabe einen signifikanten Ausreißer darstellt. Aufbauend auf den ermittelten und plausibilisierten gravimetrischen Energiedichten des Wasserstofftanksystems wird eine Regression auf Basis einer Potenzfunktion, vgl. Gleichung 3-1, durchgeführt. Die Abbildung 3-25 visualisiert sowohl die plausibilisierten Werte und die Regressionsfunktion als auch das ermittelte Bestimmtheitsmaß R^2 .

Die ermittelte Regressionsfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,747 wird genutzt, um die gravimetrische Energiedichte des Wasserstofftanksystems für die Stützjahre 2015 und 2025 zu ermitteln. Mithilfe dieser wird eine spezifische H_2 -Tankssystemmasse von 21,46 kg/kg H_2 für das Betrachtungsjahr 2015 und von 18,49 kg/kg H_2 für das Prognosejahr 2025 festgestellt und für die Auslegung der Brennstoffzellenfahrzeugvarianten berücksichtigt. Methodenbedingt liegen die ermittelten Ergebnisse

einer Regressionsfunktion zwischen optimistischen und pessimistischen Angaben der Literaturwerte und spiegeln somit ein neutrales Szenario wider.

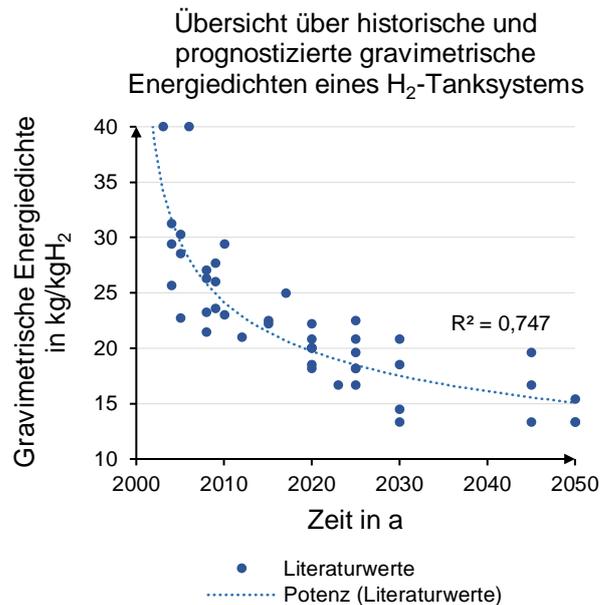


Abbildung 3-25 Übersicht über historische und prognostizierte gravimetrische Energiedichten eines H₂-Tanksystems, Daten aus: [6], [123], [129], [139], [142], [145], [150], [152]–[159]

3.3.4 Elektrische Antriebseinheit

Für die Entwicklung einer elektrischen Antriebseinheit wird ebenfalls das Vorgehen basierend auf einer Potenzfunktion, vgl. Gleichung 3-1 auf der Seite 72, angewendet. Da auch hier die spezifische Masse der Maschine von der Leistung der Einheit abhängt, wird diese differenziert betrachtet. Für die Entwicklung der Leistungsdichte der Antriebseinheit wird angenommen, dass alle Leistungsgrößen sich ähnlich entwickeln und somit die prozentuale Verbesserung für alle Leistungsklassen identisch ist. Auf dieser Annahme basierend, wird, wie in der Abbildung 3-26 a) gezeigt, die Prognose der Entwicklung der Leistungsdichte anhand einer Leistungsklasse von 50 kW bis 100 kW durchgeführt. Dazu wird eine Vielzahl von Literaturwerten und von Realdaten aus existierenden Fahrzeugen recherchiert [6]–[8], [101], [123], [139], [160]–[169] und durch die Regressionsfunktion eine relative Verbesserung für den Zeitraum 2015 bis 2025 ermittelt. Die daraus festgestellte, prozentuale Steigerung der Leistungsdichte wird auf die Ist-Werte des jeweiligen Leistungsgewichts des Jahres 2015 angewandt, um das Leistung-zu-Masse-Verhältnis für das Prognosejahr 2025 leistungsspezifisch zu bestimmen. Für die Ermittlung der Ist-Werte werden die reziproken Leistungsdichten für unterschiedliche Leistungen zwischen 25 kW und 147 kW in dem Zeitraum von 2014 bis 2016 über der Leistung aufgetragen und mittels einer Potenzfunktion eine Regressionsfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,695 gebildet, siehe Abbildung 3-26 b). Durch den daraus hergestellten Zusammenhang zwischen der Leistung und der reziproken Leistungsdichte als auch der prozentualen Verbesserung wird für jede elektrische Antriebseinheit die dazugehörige Leistungsdichte festgestellt. Analog zu der Ermittlung der Masse des Batterie- oder des Brennstoffzellensystems erfolgt eine iterative Berechnung der notwendigen Leistung und somit der spezifischen Leistungsdichte des elektrischen Antriebssystems durch das Auslegungstool.

Für die Entwicklung der Effizienz einer elektrischen Antriebseinheit wird konservativ angenommen, dass diese nur geringfügig verbessert wird. Dies wird darauf basierend begründet, dass momentan der Fokus der Entwicklung einer elektrischen Antriebseinheit auf einer Kostenreduzierung, beispielsweise durch eine Verringerung des Einsatzes seltener Erden, liegt und bereits sehr hohe Wirkungsgrade erzielt werden, vgl. Kapitel 2.5.4.

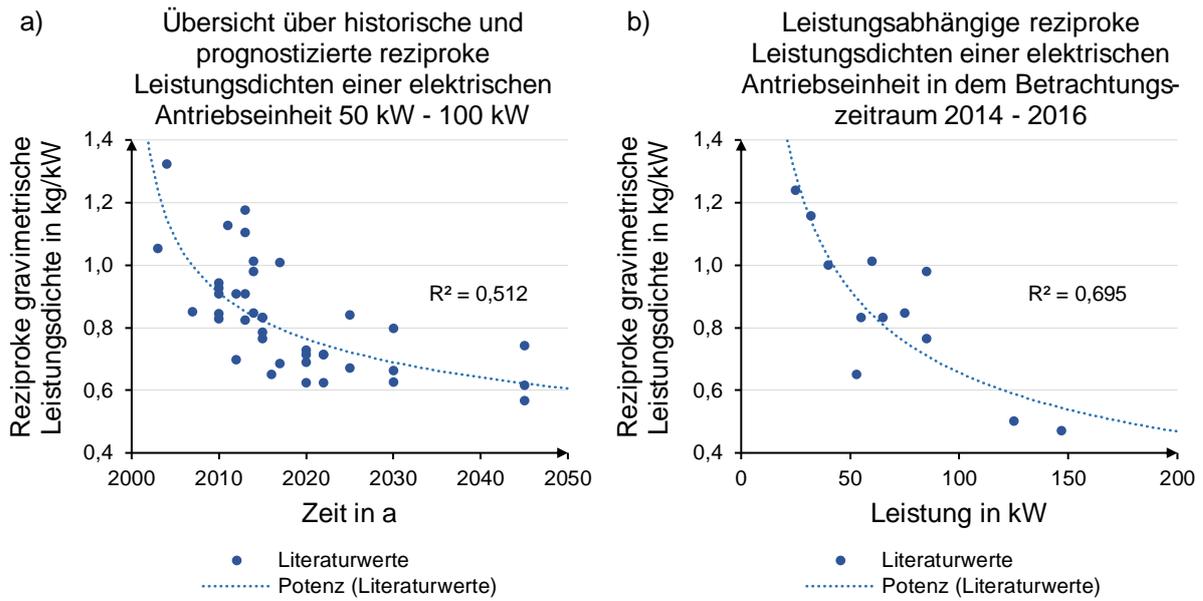


Abbildung 3-26 a) Übersicht über historische und prognostizierte reziproke Leistungsdichten einer elektrischen Antriebseinheit in der Leistungsklasse 50 kW bis 100 kW und b) leistungsabhängige reziproke Leistungsdichten einer elektrischen Antriebseinheit in dem Betrachtungszeitraum 2014 bis 2016, Daten aus [6]–[8], [101], [123], [139], [160]–[169]

3.3.5 Verbrennungsmotor

Mit dem Ziel die Komponentenmasse eines Verbrennungsmotors segmentspezifisch für das Betrachtungsjahr 2015 abzubilden, wird zunächst, wie in der, in dem Kapitel 3.1.2, beschriebenen Referenzfahrzeugbildung, die Motorenmasse der betrachteten Top-10-Fahrzeuge aus der Datenbank [101] für verfügbare Fahrzeuge ermittelt. Anschließend wird das reziproke Leistungsgewicht verbrennungsmotorspezifisch über der Leistung aufgetragen. Mittels einer Potenzfunktion, nach der Gleichung 3-1, wird daraus für jede Leistung die reziproke Leistungsdichte und über diese die Motormasse festgestellt. Die Abbildung 3-27 stellt die verwendeten Daten und die daraus ermittelte Regressionsfunktion inkl. dessen Bestimmtheitsmaß R^2 dar.

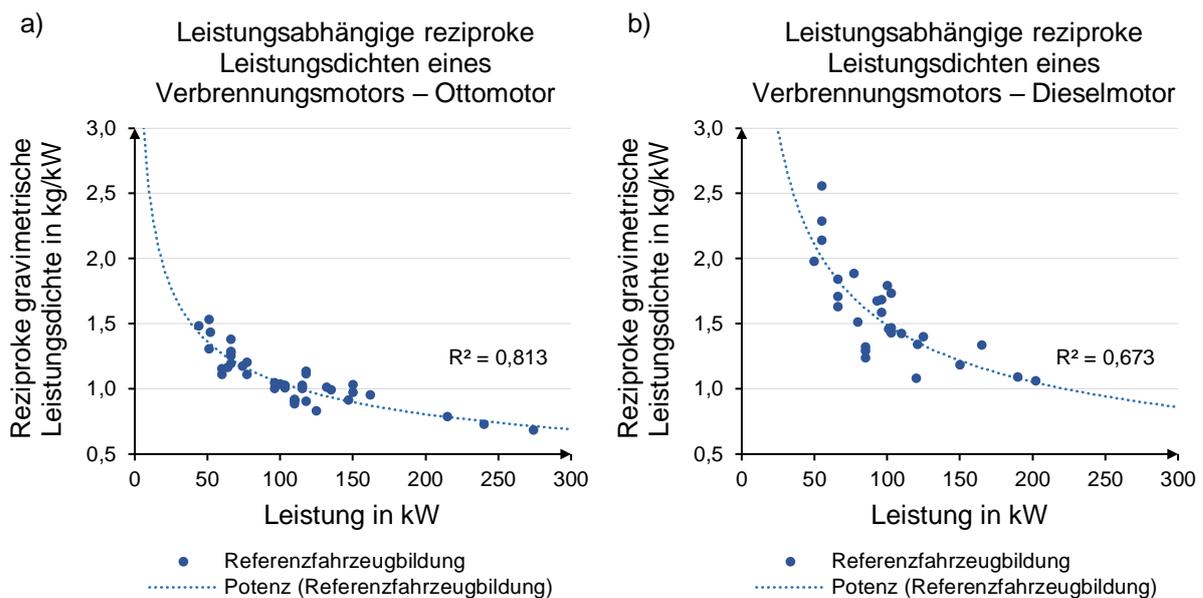


Abbildung 3-27 Leistungsabhängige reziproke Leistungsdichten eines Verbrennungsmotors a) Ottomotor und b) Dieselmotor, Daten aus [101]

In der Tabelle 3-8 sind die daraus errechneten Leistungsgewichte der Verbrennungsmotoren für die Leistungen der Referenzfahrzeuge für das Betrachtungsjahr 2015 dargestellt. Aufgrund des Aufbaus eines Otto- in dem Vergleich zu einem Dieselmotor sind die Leistungsdichten für den Verbrennungsmotor Otto folgerichtig etwas größer. Die Leistungsgewichte der Referenzfahrzeuge weichen aufgrund der Gewichtung der Segmente etwas von den dargestellten Werten ab.

Tabelle 3-8 Spezifisches Leistungsgewicht der Verbrennungsmotoren für das Jahr 2015

Fahrzeugmotor	Ottomotor			Dieselmotor			Einheit
	60 kW	100 kW	180 kW	60 kW	100 kW	180 kW	
Leistungsgewicht	0,79	0,95	1,19	0,52	0,67	0,90	kW/kg

Für die Abbildung des Verbrauchskennfelds eines Verbrennungsmotors wird zunächst die Studie „CO₂-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020“ des Instituts für Kraftfahrzeuge der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen [17] analysiert. In der genannten Studie werden analog zu der, in dem Kapitel 3.1.2 dargestellten, Methode zu der Bildung der Referenzfahrzeuge verschiedenen Fahrzeugklassen eingeteilt. Des Weiteren werden mögliche Verbrauchsverbesserungen verglichen zu dem Referenzjahr 2010 für verschiedene Stützjahre anhand von Technologiepaketen (beispielsweise Stufe des Downsizings, Zylinderabschaltung, variabler Ventiltrieb, ...) segment-spezifisch und lastabhängig ermittelt. Mittels einer Betrachtung der in den Referenzmotoren verbauten Technologien und einer Annahme einer jährlich konstanten, prozentualen Verbesserung durch die noch nicht verbauten Optimierungen, ist es möglich die Verbrauchskennfelder für die Verbrennungsmotoren Otto und Diesel der Segmente klein, mittel und groß für verschiedene Betrachtungsjahre zu berechnen. Mit dem Ziel den beschriebenen Vorgang zu plausibilisieren, werden die Verbrauchskennfelder des Segments mittel mit jenen in den JEC Tank-to-Wheels-Reports angegebenen Bestpunktverbräuchen für das C-Segment in den Jahren 2015, 2020 und 2025 in Relation gesetzt [6], [74]. Bei dem Vergleich mit den Werten zeigt sich, dass die maximale Abweichung von dem Bestpunkt lediglich 2,2 % beträgt. Basierend auf dieser guten Übereinstimmung wird die Methode als hinreichend genau eingestuft und das Verfahren folglich angewandt. Die beschriebene Vorgehensweise für eine plausible Verbrauchsanpassung und -prognose der Verbrennungsmotoren wurde in dem Rahmen einer angeleitete Studienabschlussarbeit [170] gemeinsam entwickelt und ist in dieser umfangreich dokumentiert.

3.3.6 Sonstige Massenermittlungen und Übersicht

Neben den bereits beschriebenen Komponentenmassen sind weitere Bauteile antriebsspezifisch verbaut. Dazu zählen unter anderem das Abgassystem, das Getriebe, das Tanksystem und die Kühlkreisläufe. Das Abgassystem wird dabei nach der Leistung und der Antriebsart (Otto- oder Dieselmotor) anhand einer Massenermittlung aus der Referenzfahrzeugbildung verwendet. Bei einer Massenberechnung für das Getriebe wird ebenfalls für die Referenzfahrzeuge die berechnete Masse und die Getriebearbeit (manuelles Getriebe für das Segment 1 und das Segment 2 und automatisches Getriebe für das Segment 3) genutzt. Für die Übersetzung der alternativen Antriebe wird ein einstufiges Getriebe mit einer Masse von 10 kg, analog der JEC-Studie [74], verrechnet. Für das Tanksystem der Antriebe mit einem Verbrennungsmotor werden die über die Referenzfahrzeugbildung gemittelten Werte angewandt. Der Tankinhalt wird antriebsspezifisch über die Reichweitenanforderung und den Energieverbrauch bestimmt. Der Aufbau der Kühlkreisläufe erfolgt ebenfalls antriebsspezifisch. Die Masse der Kühlkreisläufe wird in Abhängigkeit der Verlustleistung und der Komponentengrößen berechnet. Dabei werden die Kühlermassen der Kreisläufe mit einer niedrigen Temperatur (NT-Kreislauf - Batterie und Elektromotor) und jene mit einer hohen Temperatur (Brennstoffzellensystem bzw. Verbrennungsmotor) und das Fluidvolumen der dazugehörigen Komponenten Batteriesystem, Brennstoffzellensystem und elektrische Antriebseinheit in Abhängigkeit des Energieinhalts bzw. der Leistung linear skaliert. Als Basiswerte der Kühler des Verbrennungsmotors dienen ermittelte Werte aus der Referenzfahrzeugbildung. Die Kühler-eigenschaften der restlichen Kreisläufe, das Kühlvolumen der zu skalierenden Komponenten, die als konstant angenommenen Kreislaufbauteile und die Massen der Pumpen entstammen Realwerten aus einer Fachabteilung der Firma Daimler AG [171], der Datenbank A2Mac1 [101] und Hersteller- bzw. After-Sales-Angaben [102].

In der Tabelle 3-9 sind die für die Auslegung der Antriebe verwendeten Komponenten, die Art der Massenberechnung und die Datenherkunft zusammengefasst.

Tabelle 3-9 Übersicht über die Ermittlung der Komponentenmassen

Komponente	Art der Massenberechnung	Datenherkunft
Abgassystem	Nach Leistung und Antriebsart	Skalierte Werte aus der Referenzfahrzeugbildung
Batteriesystem	Nach Energiemenge und Zelltyp	Regressionsfunktion über historische und prognostizierte IST- und Literaturwerte
Brennstoffzellensystem	Nach Leistung	Regressionsfunktion über historische und prognostizierte IST- und Literaturwerte
Elektrisches Netz	Statisch	Aus dem JEC Tank-to-Wheel-Report [6]
Elektromotor	Nach Leistung	Regressionsfunktion über historische und prognostizierte IST- und Literaturwerte
Getriebe	Statisch (ein- / mehrstufig)	Einstufig: aus dem JEC Tank-to-Wheel-Report [6] Mehrstufig: aus der Referenzfahrzeugbildung
Karosserie	Statisch (segmentspezifisch)	Aus der Referenzfahrzeugbildung
Kühlkreislauf	Nach Leistung und Komponentengröße	Aus der Referenzfahrzeugbildung, aus der Datenbank [101] und aus einer Fachabteilung der Daimler AG [171]
Tanksystem Brennstoffzelle	Nach Energiemenge	Regressionsfunktion über historische und prognostizierte IST- und Literaturwerte
Tanksystem Verbrennungsmotor	Statisch (segmentspezifisch)	Aus der Referenzfahrzeugbildung
Tankinhalt Benzin / Diesel / H ₂	Nach Reichweitenanforderung	Benzin und Diesel: aus der Referenzfahrzeugbildung H ₂ : aus dem Auslegungstool
Verbrennungsmotor	Statisch (segmentspezifisch)	Aus der Referenzfahrzeugbildung

3.4 Vorgehen für die Auslegung der Antriebe für das Prognosejahr 2025

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, ändern sich die Fahranforderungen und die Komponenteneigenschaften in dem Zeitraum 2015 auf 2025 merklich. Mit dem Ziel die Antriebe für das Prognosejahr 2025 adäquat anzupassen, werden zunächst die Höchstgeschwindigkeit, die Beschleunigungszeiten von 0 km/h auf 100 km/h und von 80 km/h auf 120 km/h und die erforderliche Reichweite in dem relevanten Zertifizierungszyklus prognostiziert.

Die Prognose der Höchstgeschwindigkeit erfolgt dabei analog der in dem Unterkapitel 3.2.1 beschriebenen Entwicklung der Leistung. Über eine lineare Funktion werden für jede Fahrzeugklasse des europäischen Fahrzeugmarkts die historischen Werte der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit regressiert, anschließend extrapoliert und mit dem Marktanteil der ebenfalls in dem Kapitel 3.2.1 gezeigten, prognostizierten Verkaufszahlen zu einer segmentspezifischen Leistung gewichtet. Die Abbildung 3-28 visualisiert die Durchführung und die daraus ermittelten Höchstgeschwindigkeiten. Mittels der Anwendung dieser vereinfachten Methodik wird eine Höchstgeschwindigkeit von ca. 180 km/h für das Segment 1, von ca. 209 km/h für das Segment 2 und von ca. 246 km/h für das Segment 3 für das Prognosejahr 2025 prognostiziert und für die Auslegung der konventionellen Antriebe herangezogen. Anzumerken ist dabei, dass die gewählte, lineare Regression eine starke Vereinfachung der Entwicklung der Höchstgeschwindigkeit widerspiegelt und dies eine simple Annahme darstellt. Für alternative Antriebe werden moderat gestiegene Höchstgeschwindigkeiten definiert.

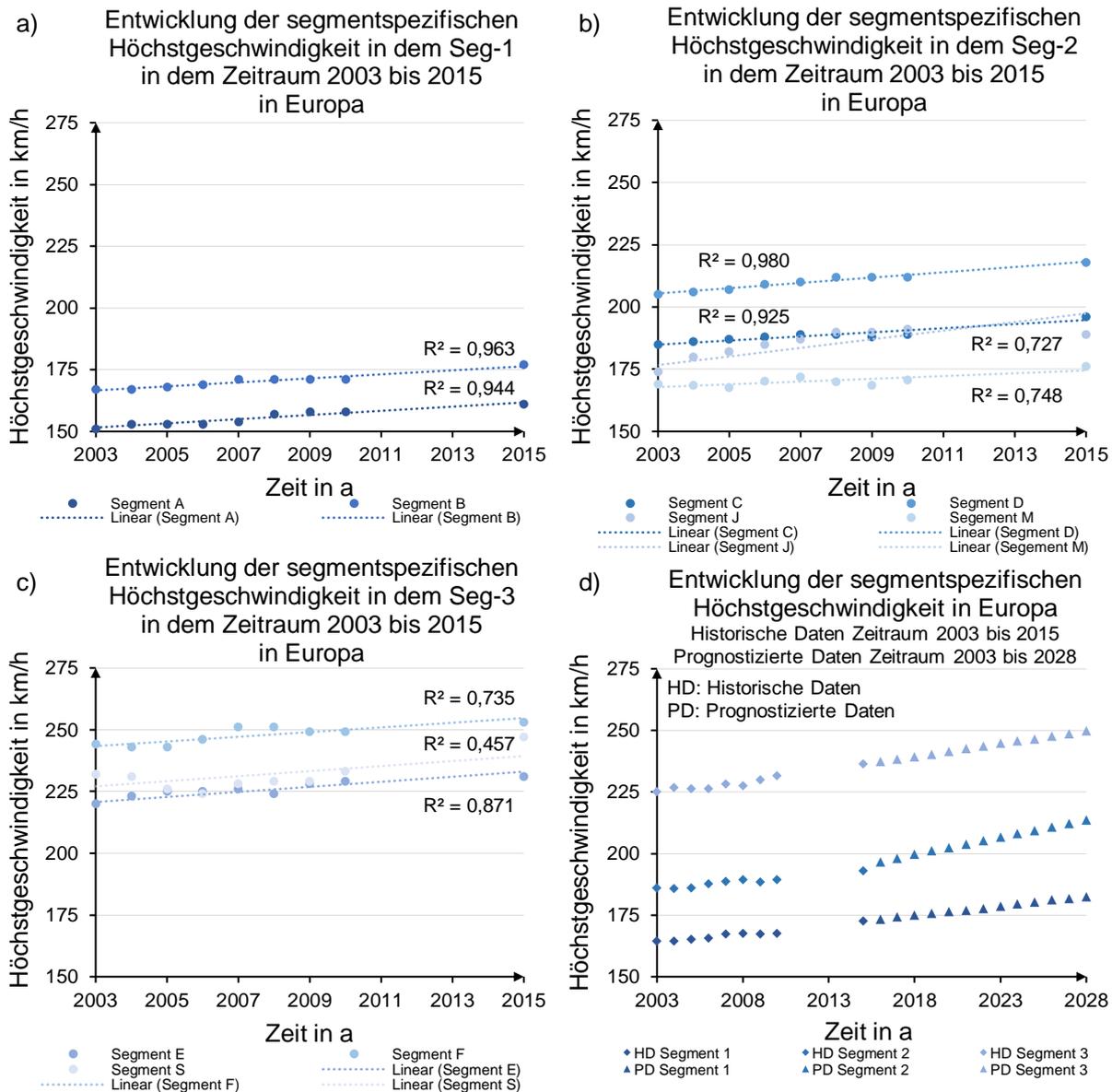


Abbildung 3-28 Entwicklung der Höchstgeschwindigkeit historische Werte a) in dem Seg-1, b) in dem Seg-2 c) in dem Seg-3 und Prognose d) Seg-1, Seg-2 und Seg-3, Daten aus [99]

Über die prognostizierten Höchstgeschwindigkeiten und die ermittelten Fahrzeugeigenschaften, c_w -Wert, Stirnfläche, Fahrzeugmasse und Antriebsstrangleistung, der Fahrzeuge mit Ottomotor werden die neuen Beschleunigungszeiten für das Prognosejahr 2025 ermittelt. Dazu werden die Getriebeauslegung und die Kennlinie der maximalen Leistung des Verbrennungsmotors angepasst. Bei der Auslegung des Getriebes wird angenommen, dass die neue Höchstgeschwindigkeit bei gleicher Motordrehzahl und Gang erreicht wird. Zudem werden die ersten Übersetzungsstufen konstant gehalten, um die Fahrbarkeit der Schrittgeschwindigkeit zu gewährleisten und das abgestimmte Anfahrverhalten beizubehalten. Falls ein Overdrive³⁹ vorhanden ist, wird dieser analog dem Verhältnis der Getriebestufe des Betrachtungsjahrs 2015 angepasst. Die Übersetzungsstufen der verbleibenden Übersetzungen werden progressiv ausgelegt. Über die so definierten Fahrzeugeigenschaften werden die Beschleunigungszeiten für das Prognosejahr 2025 segmentspezifisch berechnet. Für das Segment 1 ergibt eine Zeitspanne von 12,3 s, für Segment 2 10,1 s und für Segment 3 7,0 s für eine Geschwindigkeitserhöhung von

³⁹ Overdrive bezeichnet eine Übersetzungsstufe, welche hauptsächlich den Nutzen der Kraftstoffeinsparung besitzt.

0 km/h auf 100 km/h und 9,9 s für das Segment 1, 8,6 s für das Segment 2 und 4,5 s für das Segment 3 für eine Beschleunigung von 80 km/h auf 120 km/h. Diese Zeiten werden für die Auslegung verwendet.

Für die Entwicklung der Reichweite der Fahrzeugvarianten batterieelektrisches und brennstoffzellenbetriebenes Fahrzeug werden Definitionen verwendet. Für die Antriebsvariante FCEV wird lediglich die Reichweiten des ersten Segments von 350 km auf 450 km erhöht. Die Reichweite des zweiten Segments und jene des dritten Segments wird mit 500 km und mit 600 km für das Prognosejahr 2025 für ein Brennstoffzellenfahrzeug als ausreichend erachtet. Für die BEV-Derivate werden durchgängig erhöhte Reichweiten erwartet. Diesbezüglich wird für das erste Segment eine Reichweite von 300 km, für das zweite Segment eine Reichweite von 400 km und für das dritte Segment eine Reichweite von 500 km definiert und für die Auslegung der Antriebe herangezogen.

4 Aufbau und Validierung auf Komponenten-, auf Modul- und auf Gesamtfahrzeugebene

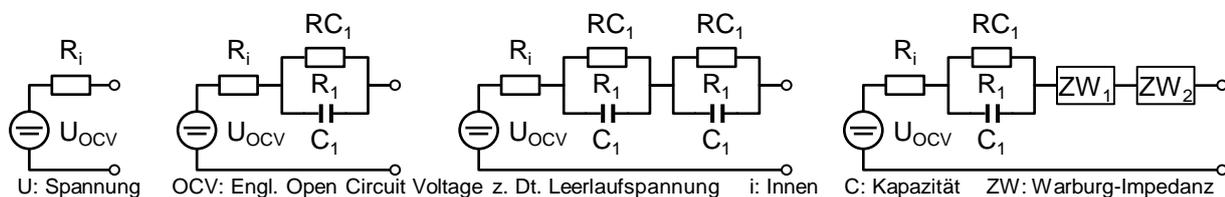
In dem folgenden Kapitel erfolgt zunächst eine Beschreibung des Aufbaus und der durchgeführten Validierung auf Komponentenebene. Auf dieser Ebene werden die verschiedenen Batteriesysteme, das Brennstoffzellensystem, die elektrische Antriebseinheit und der Verbrennungsmotor betrachtet. Anschließend wird auf Modulebene das Verhalten des Rollwiderstands, die Klimatisierung der Fahrgastzelle in dem Aufheiz- und in dem Abkühlfall, gefolgt von einer Analyse des Fahrzeugverbrauchs ohne den Einfluss der Nebenverbraucher, untersucht. Abschließend wird der Energiebedarf auf Gesamtfahrzeugebene anhand eines Batteriefahrzeugs und anhand eines Fahrzeugs mit einem Ottomotor validiert.

4.1 Batteriesystem

Wie in dem Kapitel 3.3.1 beschrieben, werden die verwendeten Batteriesysteme modular aufgebaut. Der dazu verwendete elektrische und thermische Aufbau wird zunächst erläutert und anschließend die Validierungen beschrieben. Dabei wird für jede Batterietypvariante (BEV/REEV-, PHEV- und HEV-Zelle) ein reales Batteriesystem modelliert, simuliert und eine Validierung anhand diesem vollzogen.

Aufbau des Batteriesystems:

Als Grundlage für den Aufbau der Batteriesysteme dienen Geometrien, Materialeigenschaften und Wärmeübergänge real existierender Batterieeinheiten. Als Kernstück besitzt der modulare Aufbau des Batteriesystems die jeweilige Zellgeometrie eines Zelltyps und dessen thermische Anbindung. Als elektrisches Ersatzschaltbild wird ein Aufbau mit einem R- und mit zwei RC-Gliedern realisiert. Die Abbildung 4-1 zeigt, dass die gewählte Approximation einem effizienten Kompromiss aus erforderlicher Genauigkeit und vertretbarer Rechendauer entspricht. Durch die Verwendung der beiden RC-Glieder wird nach [172] neben dem statischen auch das dynamische Verhalten ausreichend genau abgebildet.

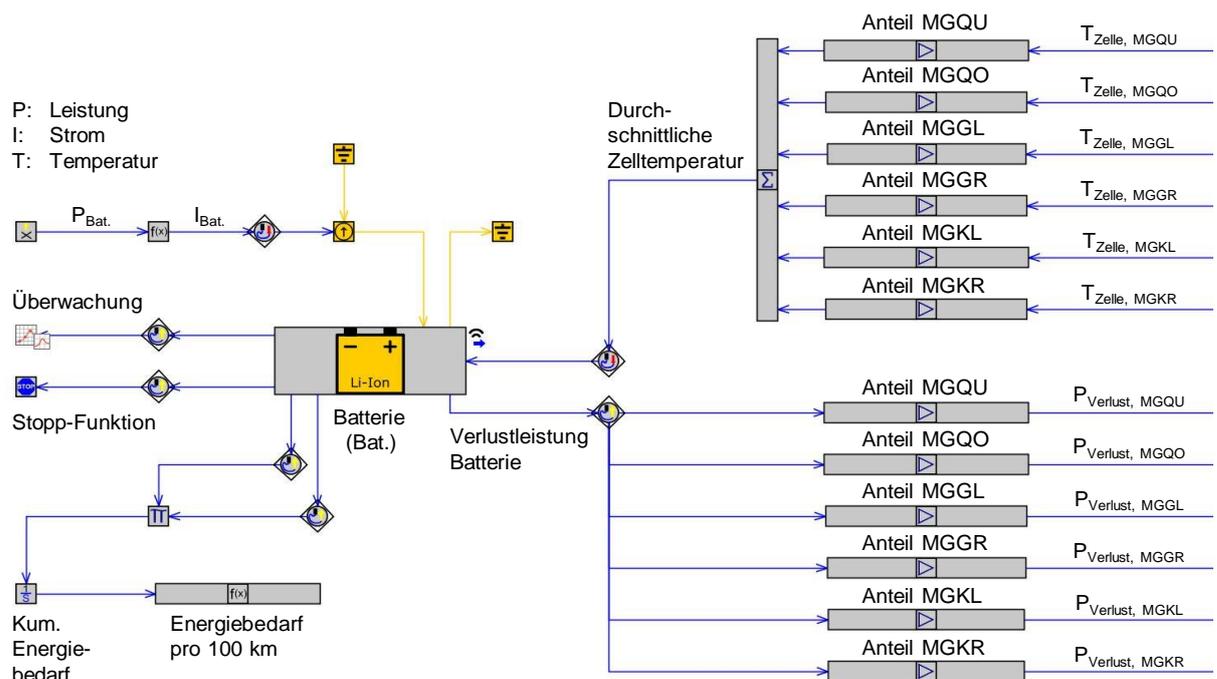


Geschwindigkeit

Genauigkeit

Abbildung 4-1 Übersicht über unterschiedliche elektrische Ersatzschaltbilder nach [172]

Die Parametrierung des elektrischen Ersatzschaltbilds erfolgt strom-, temperatur- und ladezustandsabhängig. Die verwendeten Eingabegrößen entstammen realen Zellen und werden durch die Firma Deutsche Accumotive GmbH [133] bereitgestellt. In der Simulationsumgebung können die Inputparameter des elektrischen Ersatzschaltbilds in eine vorhandene Vorlage eingegeben werden. Wie in der Abbildung 4-2 dargestellt, wird die Batterie über einen, aus einer Leistungsanfrage resultierenden, Strom, je nach dessen Vorzeichen, ge- oder entladen. Mittels des elektrischen Ersatzschaltbilds wird die Verlustleistung berechnet und auf ein eigenständig entwickeltes, vollvariables Batteriemodell bzw. auf dessen einzelne Module aufgeteilt. Die Verteilung der Verlustleistung erfolgt dabei anhand des Verhältnisses der Batteriezellen je Modul zu der Anzahl der Gesamtmenge der Zellen. Durch die entstehende Verlustleistung bei dem Laden oder bei dem Entladen werden die Zellen erwärmt. Die sich dadurch verändernde Zelltemperatur wird modulweise detektiert und über das Verhältnis der Anzahl der Zellen eine durchschnittliche Temperatur dieser gebildet. Die gemittelte Temperatur wird der Batteriezelle aufgeprägt und die entsprechenden, temperaturabhängigen R- und C-Parameter verwendet. Zusätzlich wird der Ladezustand des Batteriesystems bilanziert und ebenfalls in der R-C-Wahl berücksichtigt. Des Weiteren ist ein Monitor zu der Überwachung, eine Stoppfunktion zu dem Detektieren einer leeren Batterie, ein Integral zu der Bilanzierung der Energiemenge und eine direkte Berechnung des durchschnittlichen Energiebedarfs pro 100 km modelliert.



MG: Modulgehäuse QU: Quer unten QO: Quer oben GL: Groß links GR: Groß rechts KL: Klein links KR: Klein rechts

Abbildung 4-2 Modellierung der Batterie in GT-SUITE, Bild aus [92]

Die Abbildung 4-3 stellt die thermische Modellierung eines Batteriemoduls schematisch dar.

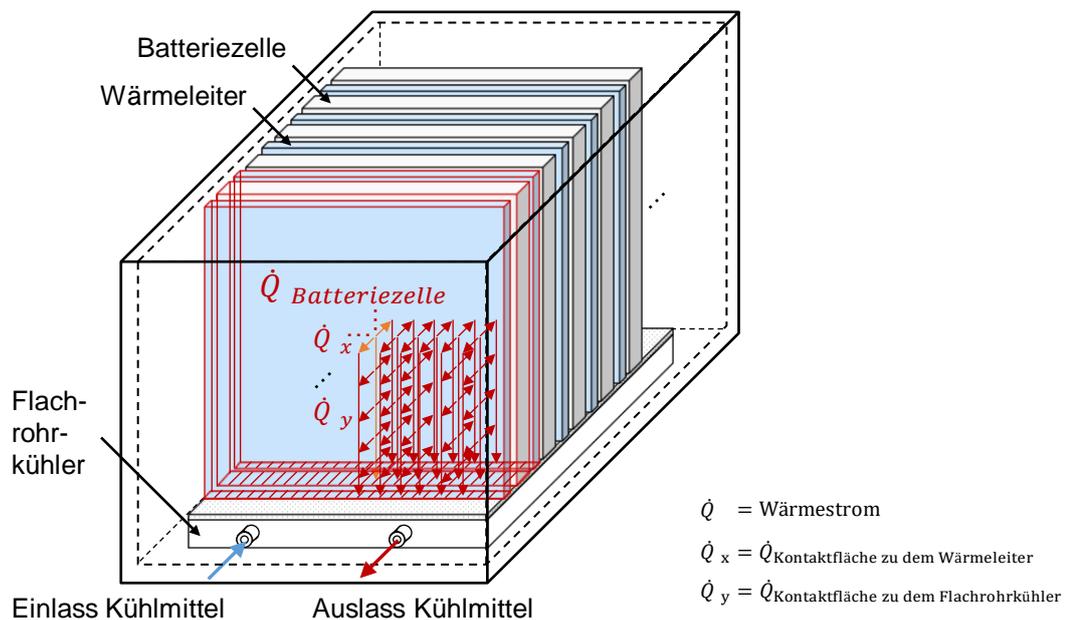


Abbildung 4-3 Schematische Darstellung der thermischen Modellierung eines Batteriemoduls

Hierbei wird vereinfacht angenommen, dass jene, auf der Verlustleistung basierende, Wärme homogen in den Zellen entsteht. Getrieben von einer Temperaturdifferenz wird eine Wärmemenge über einen Wärmeleiter je zwei Zellen und über die direkte Kontaktfläche der Zelle zu dem Kühler transportiert. Zwischen den Batteriezellen, dem Wärmeleiter und den Kontaktflächen zu dem Kühler befindet sich eine Schicht Wärmeleitpaste. Diese dient der Erhöhung des Wärmeübergangs. Als Kühlerform wird ein Flachrohrkühler verwendet, welcher mit einem zelltemperaturabhängigen Kühlmittelstrom durchströmt wird. Umschlossen ist der Batteriezellverbund durch ein Modulgehäuse. Die Anordnung und die Befül-

lung der Module erfolgen, wie in dem Kapitel 3.3.1 beschrieben, iterativ, vollvariabel und bedarfsge- recht. Maximal werden sechs Module in dem segmentspezifisch definierten Bauraum aufgebaut. Wie in der Abbildung 3-23 auf der Seite 77 gezeigt, sind die Module seitlich durch eine Crashstruktur geschützt, nach oben mit einer Abdeckung und anschließend den Elektrik/Elektronik-Komponenten und nach unten mit einem verstärkten Unterboden verbunden. Die Abbildung 4-4 stellt die simulative Umsetzung stellvertretend anhand des Aufbaus für ein Modul dar.

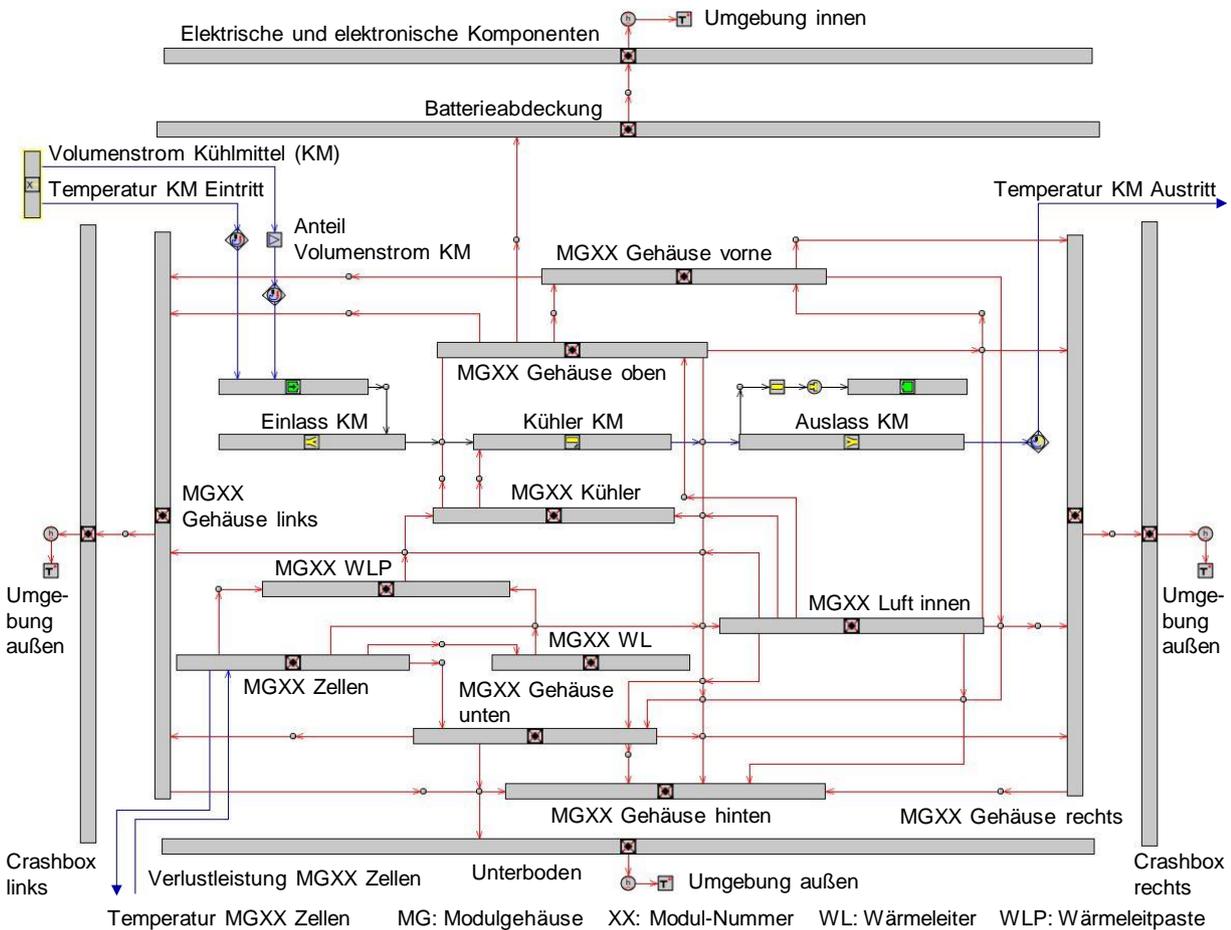


Abbildung 4-4 Modellierung eines Batteriemoduls in GT-SUITE, Bild aus [92]

Das gesamte Batteriesystem setzt sich aus bis zu sechs Modulen zusammen, vgl. Abbildung 4-5. Je nach Anordnung der Module sind die jeweiligen Gehäuseaußenflächen mit der Crashstruktur links bzw. rechts, dem Unterboden und der Batterieabdeckung in einem Wärmeaustausch. Die Crashbox, sowie der Unterboden sind mit der Außenluft konvektiv verbunden. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird dabei geschwindigkeitsabhängig nach [173] modelliert.

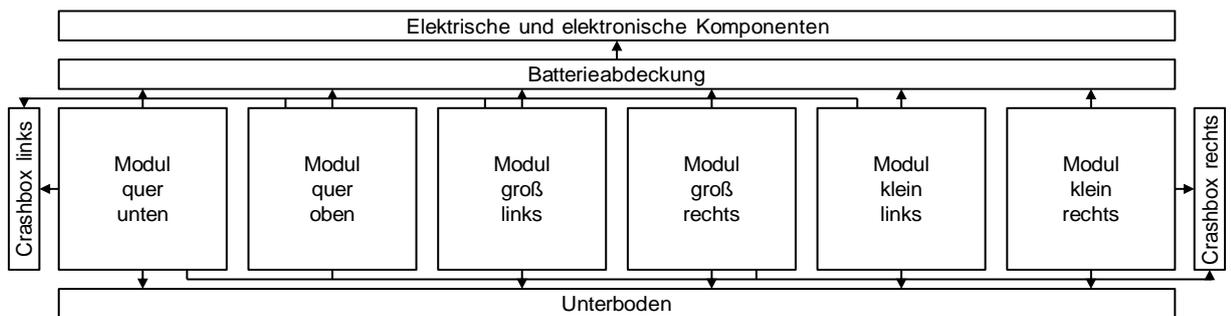


Abbildung 4-5 Schematischer, vollvariabler Aufbau der Modellierung eines gesamten Batteriesystems

Der Massenstrom des Kühlmittels wird bei dem Eintritt in das Batteriesystem in Abhängigkeit der Zellen pro Modul auf die Module aufgeteilt und durch den Wärmestrom über den Kühler erwärmt. Bei dem Austritt aus dem Batteriesystem wird der Massenstrom des Kühlmittels wieder vereint. Die Austrittstemperatur des Kühlmittels wird analog der Eintrittstemperatur gewichtet, vgl. Abbildung 4-6.

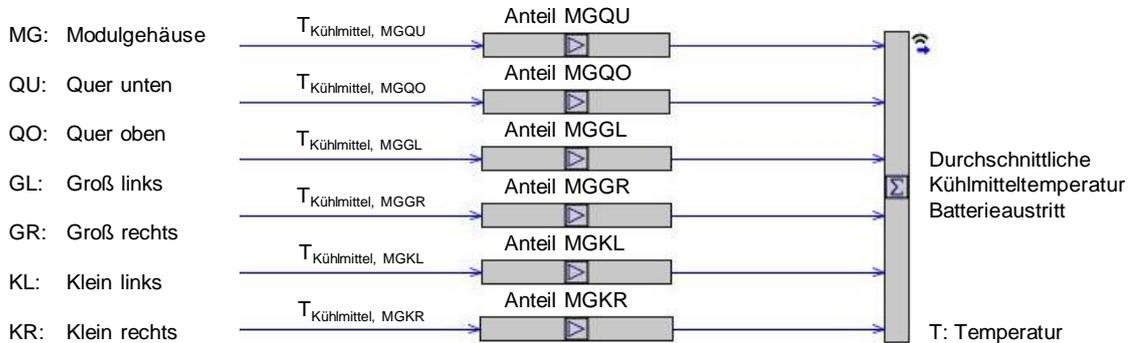


Abbildung 4-6 Modellierung der Kühlmitteltemperatur bei dem Batterieaustritt in GT-SUITE, Bild aus [92]

Insgesamt wird über die verwendete Modellierung ein Batteriesystem mit 836 Parametern bedarfsge- recht aufgebaut. Über die, aus dem Auslegungstool ermittelten, segmentspezifischen Eigenschaften wird das verwendete Batteriesystem vollautomatisch parametrier und in der Gesamtfahrzeugsimulation verwendet.

Validierung des Batteriesystems:

Für die Batterietypen BEV/REEV, PHEV und HEV wird jeweils ein Referenzbatteriesystem in der Simu- lationsumgebung GT-SUITE aufgebaut und sowohl die Temperatur der Zelle als auch die Austrittstem- peratur des Kühlmittels anhand einem, je Zelltyp, validierten Batteriemodell [174] verglichen. Der Aufbau und das resultierende Verhalten der Batteriesysteme werden damit überprüft. Die Abbildung 4-7 zeigt schematisch das Vorgehen bei der Batterievalidierung und dass in diesem Zusammenhang sowohl sta- tionäre als auch transiente Lastkollektive betrachtet werden. Die in dem Rahmen dessen für die Para- metrierung verwendeten, physikalischen Eigenschaften der Batteriesysteme, wie beispielsweise die Zell- oder die Kühlergeometrie, entstammen Angaben aus [133]. Ist das Verhalten der Temperatur der Zelle, jenes der Austrittstemperatur des Kühlmittels und jenes des Ladezustands der beiden Batterie- systeme, validiertes und simuliertes Batteriemodell, identisch, kann eine Skalierung der physikalischen Eigenschaften erfolgen. Ist dies zutreffend, können die segmentspezifischen Batteriesysteme, wie in dem Kapitel 3.3.1 gezeigt, ausgelegt werden.

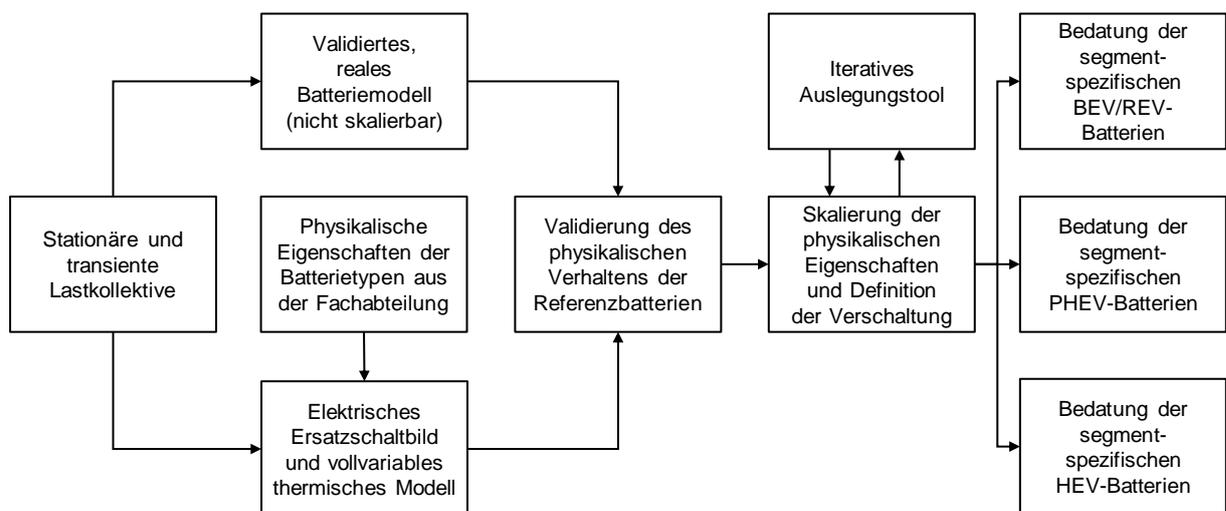


Abbildung 4-7 Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Batterievalidierung

Validierung des BEV- und REEV-Batteriesystems:

Für eine Validierung des BEV- bzw. des REEV-Batteriesystems dienen ein real existierendes Batteriesystem und die Analyse statischer und dynamischer Lastkollektive. Bei der stationären Betrachtung des BEV/REEV-Batteriesystems werden verschiedene Starttemperaturen von -20 °C bis $+30\text{ °C}$ in 10-Kelvin-Schritten mit und ohne Volumenstrom bei einer konstanten Entladerate von 0,5 C, 1,0 C und 2,0 C oder ohne Entladung – Analyse des Abkühl- und des Aufheizverhaltens durch das Kühlmittel – untersucht. In den transienten Fällen werden repräsentative Lastkollektive für die Fahrsituationen Innerorts, Außerorts und Autobahn, bei unterschiedlichen Starttemperaturen mit und ohne Kühlmittelvolumenstrom betrachtet. Dabei werden Stromprofile verwendet, welche einer Simulation eines Batteriefahrzeugs der Mittelklasse entstammen. Die durch die Simulation ermittelten Verläufe der Temperaturen und des Ladezustands der stationären und der transienten Lasten werden anschließend mit den Ergebnissen eines validierten Modells aus [133] verglichen und anhand dieser validiert.

Die Abbildung 4-8 stellt die Validierung des Verhaltens bei dem Abkühlen und jenes bei dem Aufheizen allein durch das Kühlmittel und ohne Last dar.

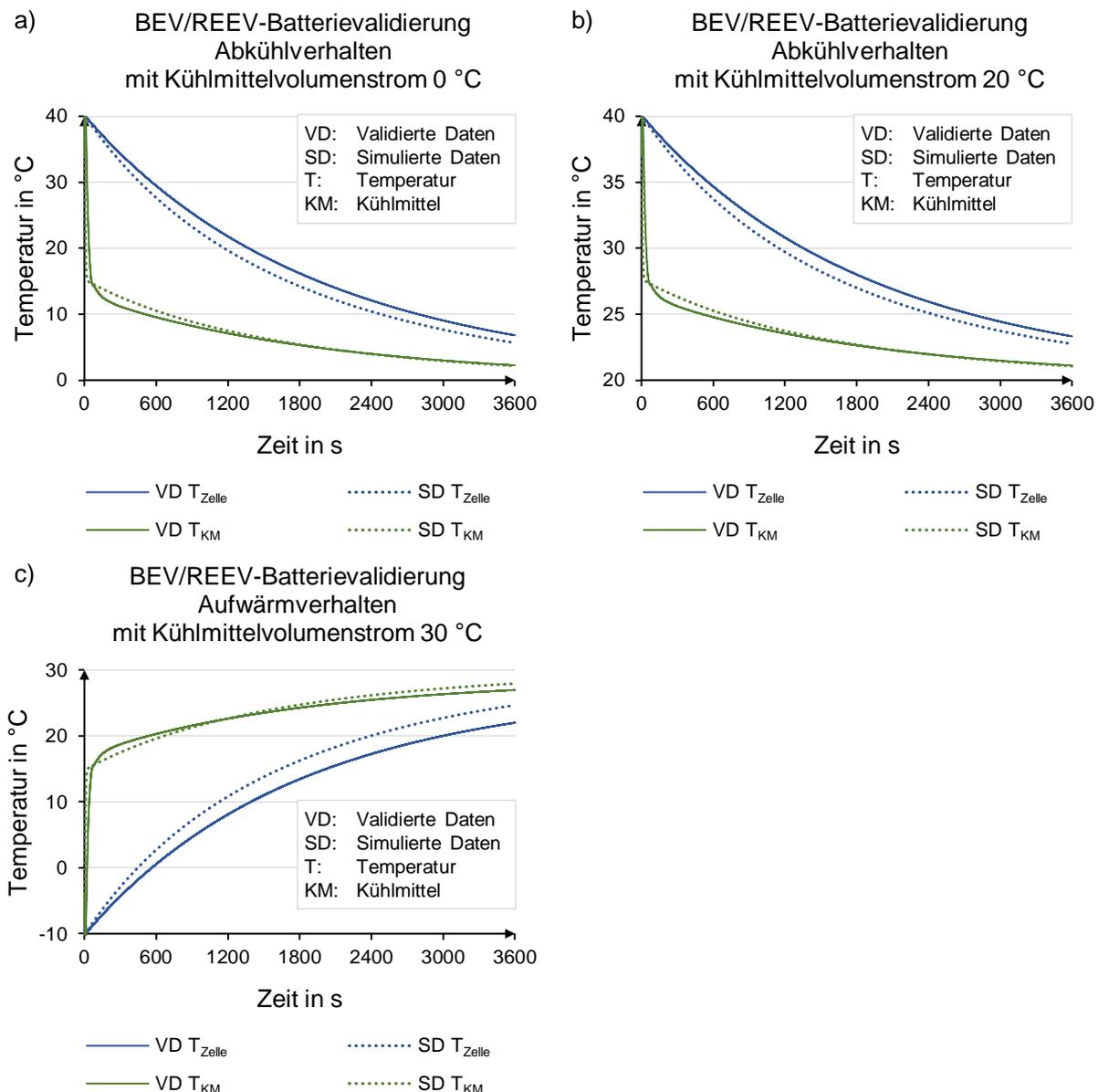


Abbildung 4-8 BEV/REEV-Batterievalidierung mit Kühlmittelmassenstrom a) Abkühlverhalten bei 0 °C , b) bei 20 °C und c) Aufwärmverhalten bei 30 °C nach [70]

In den drei Diagrammen ist jeweils der zeitliche Verlauf der Temperatur der Zelle und jener der Austrittstemperatur des Kühlmittels visualisiert. Den drei Abbildungen ist zu entnehmen, dass sich das simulierte Batteriesystem nahezu analog dem validierten verhält. Nach ca. einer Stunde der Abkühl- bzw. der Aufheizdauer ist die Differenz der Zelltemperatur jeweils kleiner als 4 K und jene des Kühlmittels jeweils kleiner als 1 K. Aufgrund der geringen Abweichung der Temperaturen und der guten Abbildung des Einschwingverlaufs wird das Verhalten des Wärmeübergangs mit Volumenstrom und ohne Last als valide angesehen.

Für eine Bewertung des stationären Verhaltens werden das Aufwärmverhalten der Zellen und jenes des Kühlmittels an dem Austritt des Batteriemoduls bei unterschiedlichen C-Raten, unterschiedlichen Starttemperaturen und mit und ohne Kühlmittelstrom analysiert. Dabei werden die bereits beschriebenen initialen Ausprägungen, -20 °C bis +30 °C in 10-Kelvin-Schritten, untersucht. Die Abbildung 4-9 stellt die erzielten Ergebnisse in dem stationären Lastfall exemplarisch dar. Das Diagramm a) zeigt den Verlauf der Temperatur der Zelle und das Diagramm b) jenen der Austrittstemperatur des Kühlmittels mit Kühlmittelvolumenstrom. Das Diagramm c) stellt den Verlauf der Temperatur der Zelle und das Diagramm d) jenen der Austrittstemperatur des Kühlmittels ohne Kühlmittelvolumenstrom dar.

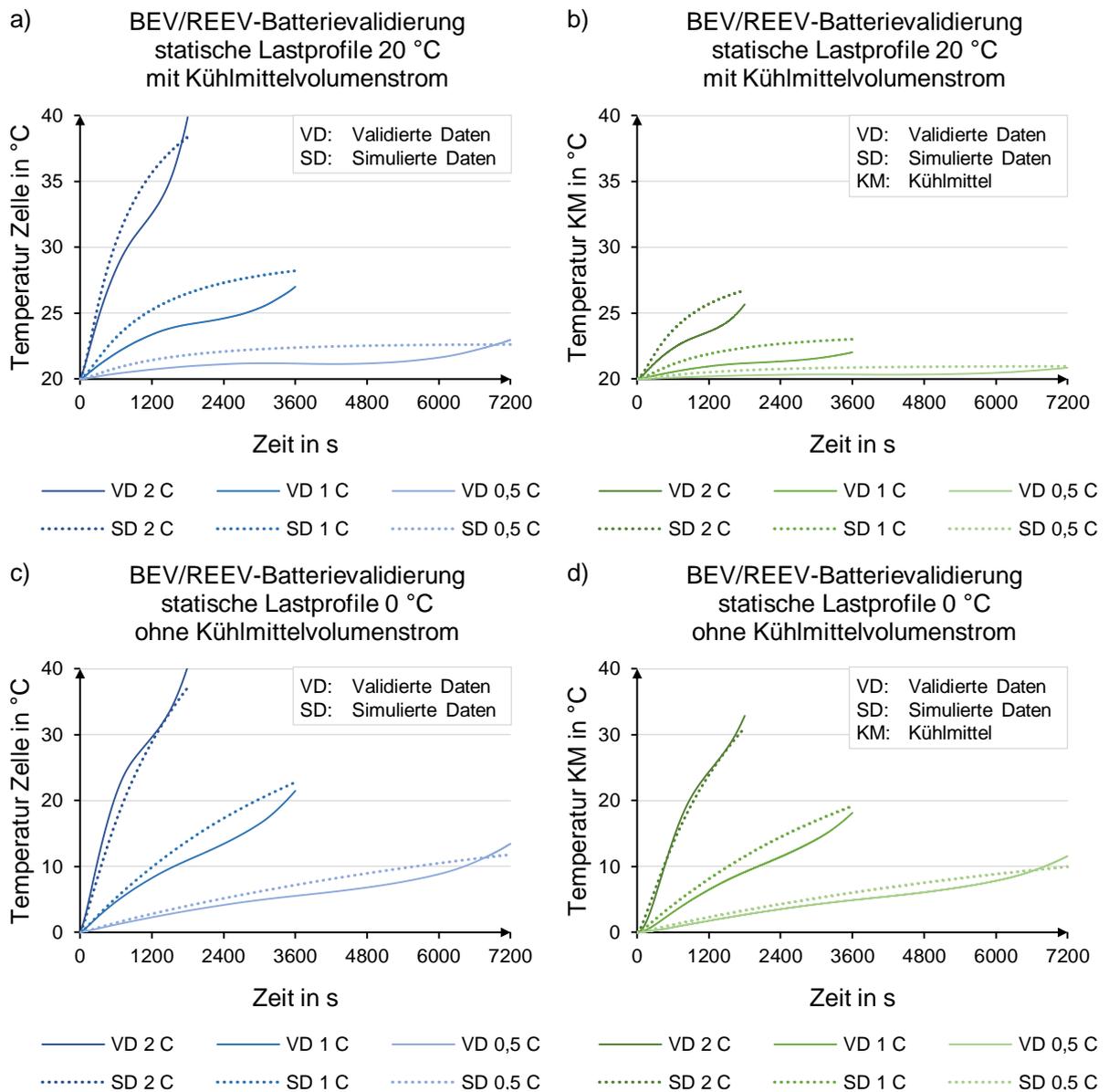


Abbildung 4-9 BEV/REEV-Batterievalidierung statische Lastprofile 0,5 C, 1,0 C und 2,0 C Entladung a) und b) bei 20 °C mit Kühlmittelvolumenstrom und c) und d) bei 0 °C ohne Kühlmittelvolumenstrom

In der Abbildung 4-9 ist zu erkennen, dass bei einer Ausgangstemperatur des Batteriesystems und der Umgebung von 20 °C, vgl. dazu Abbildung 4-9 a) und Abbildung 4-9 b), das generelle Verhalten jenem des Sollverlaufs entspricht, jedoch eine etwas erhöhte Temperatur berechnet wird. Da die maximale Differenz der Temperatur dabei ca. 2,5 K beträgt, wird die Abweichung als akzeptabel eingestuft. In der Abbildung 4-9 c) und der Abbildung 4-9 d) ist die Erwärmung ohne Kühlmittelstrom und bei einer Außen- und einer Starttemperatur der Zelle und des Kühlmittels von 0 °C dargestellt. Auch hier ist ein leicht erhöhter Verlauf der simulierten Temperaturen gegenüber den validierten Sollwerten zu erkennen. In diesem Betrachtungsszenario ist die Abweichung für eine Entladung mit 1 C etwas größer und beläuft sich auf maximal ca. 4 K. Da das untersuchte Lastprofil jedoch ohne Kühlmittelmassenstrom ist und somit einen in der Praxis nicht häufig vorkommenden Fall widerspiegelt, wird auch diese Abweichung als akzeptabel eingestuft.

Über die analysierte Temperaturspanne von -20 °C bis +30 °C ändert sich die Temperaturdifferenz der validierten zu den simulierten Daten in dem stationären Lastfall von leicht zu warm zu leicht zu kalt, vgl. Anhang 7 und Anhang 8. Auf der Änderung der Abweichung basierend wird angenommen, dass die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität der in dem Wärmepfad enthalten Materialien oder der Wärmeübergang nicht vollumfänglich abgebildet wird. Wie in der Tabelle in dem Anhang dokumentiert, sind alle Abweichungen nach einem gesamten Entladeprozess über dem Temperaturspektrum von -10 °C bis +30 °C kleiner als 7,7 K. Trotz dieser festgestellten Abweichung wird das stationäre Verhalten über dem gesamten Temperaturbereich als valide angesehen. Begründet wird dies dadurch, dass der festgestellte Fehler des Temperaturverhaltens einen reduzierten Einfluss auf den Energieverbrauch hat und dieser als annehmbar eingestuft wird.

Neben dem stationären wird zudem das transiente Verhalten anhand von drei dynamischen Lastprofilen des Artemis Innerorts, Artemis Außerorts und Artemis Autobahn, vgl. Abbildung 2-3 auf der Seite 12, untersucht. Dazu wird ein, für die Absolvierung des jeweiligen Zykluses, benötigtes Stromprofil eines Batteriefahrzeugs der Mittelklasse hinterlegt und die Erwärmung der Zell- und jene der Kühlmitteltemperatur des validierten Verhaltens mit jenen des simulierten Verhaltens verglichen. Die Abbildung 4-10 stellt die simulierten Temperaturen der Zelle und jene der Austrittstemperatur des Kühlmittels den validierten Daten für den Fahrzyklus Artemis Autobahn gegenüber.

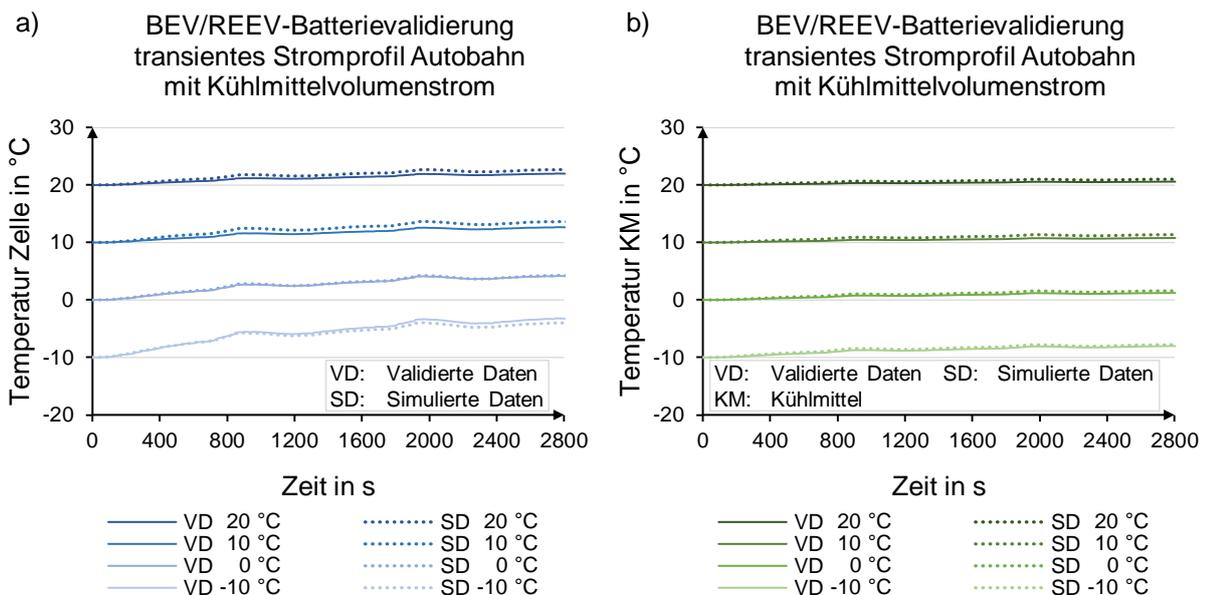


Abbildung 4-10 BEV/REEV-Batterievalidierung transientes Stromprofil Autobahn bei unterschiedlichen Start- und Umgebungsbedingungen a) Zelltemperatur- und b) Kühlmitteltemperaturentwicklung nach [70]

Anhand des gezeigten Vergleichs des Verlaufs der Temperatur der Zelle und jenem der Austrittstemperatur des Kühlmittels wird festgestellt, dass das transiente Verhalten über eine Simulationszeit von 2 800 s gut abgebildet wird. Die simulierten Temperaturen folgen den validierten mit einer Abweichung kleiner als 1 K, allerdings erwärmen sich die Zellen aufgrund eines hohen Volumenstroms, einer relativ geringen Verlustleistung und einer hohen Masse des Batteriesystems auch nur geringfügig. Dennoch wird das thermische Verhalten der Zelle und jenes der Austrittstemperatur des Kühlmittels auch in dem transienten Fall als valide angesehen, da das thermische Verhalten auch in dem Lastfall Innerorts und in dem Lastfall Außerorts eine gute Übereinstimmung zeigt, vgl. dazu den Anhang 13 und den Anhang 14.

Neben dem thermischen Verhalten des Batteriesystems wird zudem die Änderung des Ladezustands betrachtet. Dazu wird in den beschriebenen Lastfällen jeweils die Entladung in der Form des SOC-Verlaufs verglichen. In dem Anhang 17 ist der SOC-Verlauf beispielhaft für einen stationären und einen transienten Fall zu sehen. Zudem sind alle Endwerte des Ladezustands in dem Anhang 7, in dem Anhang 8, in dem Anhang 13 und in dem Anhang 14 enthalten. Wie in der Darstellung und in der tabellarischen Übersicht in dem Anhang zu erkennen ist, verläuft der Ladezustand nahezu identisch. Diese festgestellte Übereinstimmung des Entladeverlaufs beruht auf einer analogen Parametrierung des elektrischen Ersatzschaltbilds.

Validierung des PHEV-Batteriesystems:

Bei der Validierung des PHEV-Batteriesystems wird analog zu dem BEV/REEV-Batteriesystem vorgegangen. Zunächst wird das Abkühl- und das Aufwärmverhalten ohne Last, gefolgt von einem stationären und einem transienten Verhalten mit Last validiert. Das PHEV-Batteriesystem wird dabei anhand unterschiedlicher Volumenströme validiert.

Die Abbildung 4-11 auf der nächsten Seite stellt das Abkühl- und das Aufheizverhalten der Temperatur der Zelle und jenes der Austrittstemperatur des Kühlmittels des PHEV-Batteriesystems mit Kühlmittelvolumenstrom dar. In den drei Diagrammen ist zu erkennen, dass das Verhalten der Temperatur der Zelle und jenes der Austrittstemperatur des Kühlmittels generell sehr ähnlich ist. Lediglich bei dem Aufheizverhalten in der Abbildung c) ist ein verzögertes Verhalten und eine Abweichung der Endtemperatur von ca. 2 K feststellbar. Da das generelle Verhalten eine gute Übereinstimmung zeigt und eine Differenz der Endtemperatur von 2 K einen geringen Einfluss auf den Energiebedarf aufweist, wird das Abkühl- und das Aufwärmverhalten des PHEV-Batteriesystems als valide betrachtet.

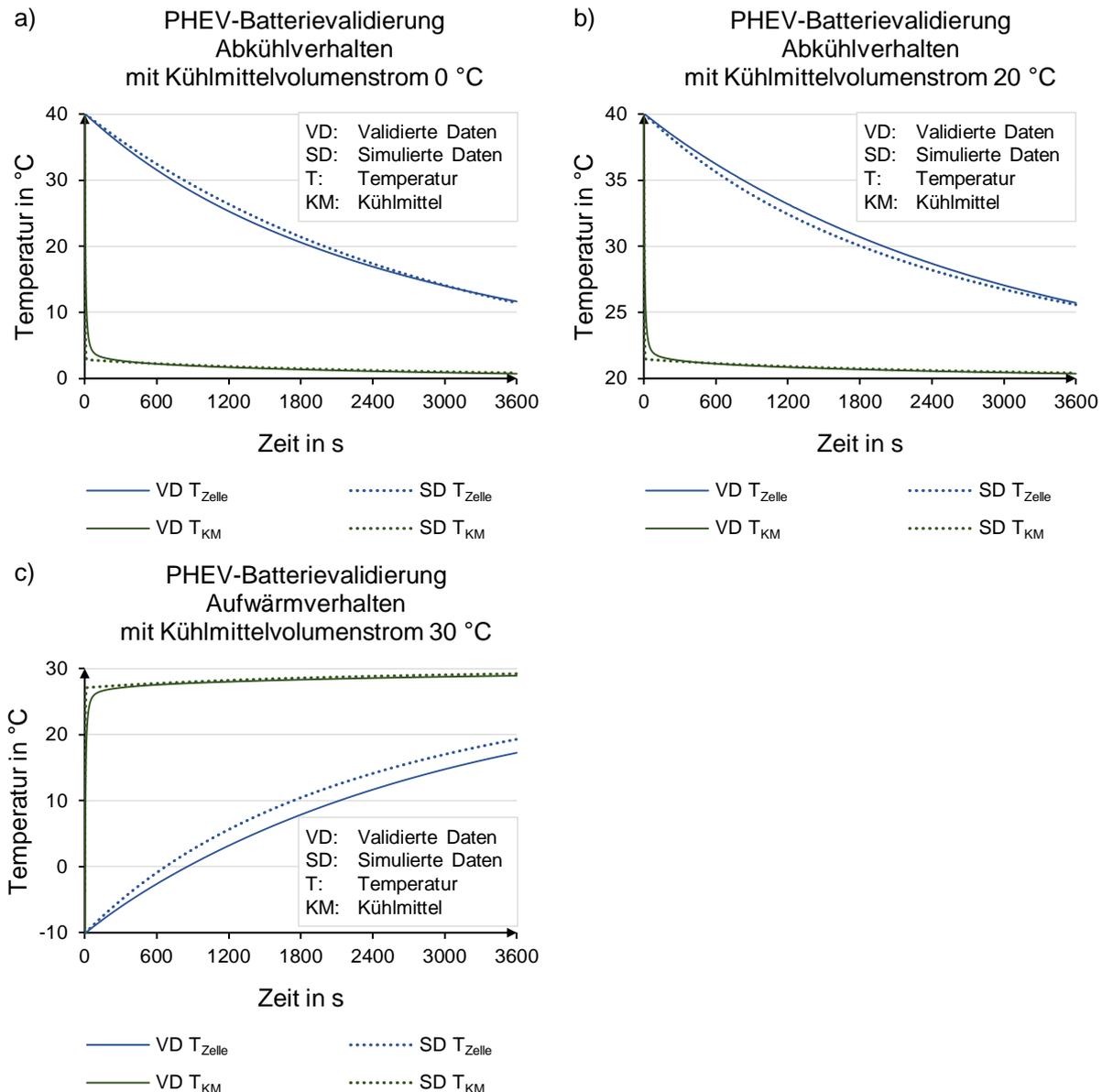


Abbildung 4-11 PHEV-Batterievalidierung mit Kühlmittelmassenstrom a) Abkühlverhalten bei 0 °C, b) bei 20 °C und c) Aufwärmverhalten bei 30 °C

Neben dem Abkühl- und dem Aufwärmverhalten ohne Last wird zudem das stationäre Verhalten mit konstanter Last untersucht. Dazu werden die Entladevorgänge mit 1 C, mit 2 C und mit 5 C für eine Temperaturspanne von -20 °C bis +30 °C in 10-Kelvin-Schritten mit und ohne Kühlmittelvolumenstrom analysiert. Die Abbildung 4-12 stellt die erzielten Ergebnisse exemplarisch dar. Das Diagramm a) zeigt den Verlauf der Temperatur der Zelle und das Diagramm b) jenen der Austrittstemperatur des Kühlmittels mit Kühlmittelvolumenstrom bei einer Starttemperatur von 20 °C. Das Diagramm c) visualisiert den Verlauf der Temperatur der Zelle und das Diagramm d) jenen der Austrittstemperatur des Kühlmittels ohne Kühlmittelvolumenstrom bei einer Ausgangstemperatur von 0 °C. In dem Betrachtungsfall 20 °C mit Kühlmittelvolumenstrom wird das Verhalten der Temperaturen gut abgebildet. Maximal wird eine Abweichung von ca. 2 K bei einer Entladung mit 2 C festgestellt. In dem Szenario 0 °C und kein Kühlmittelstrom wird das Verhalten der Temperaturen generell auch gut abgebildet. Lediglich an dem Ende des Entladevorgangs, ab ca. 90 %, wird eine erhöhte Abweichung deutlich. In diesem Bereich ist das zu der Validierung herangezogene Modell nicht validiert und die Angaben deshalb kritisch zu betrachten. Wird der Verlauf davor bewertet, wird auch in dem Szenario 0 °C und kein Kühlmittelvolumenstrom der Verlauf der Temperaturen gut abgebildet. Maximal tritt eine Abweichung von ca. 3,2 K auf.

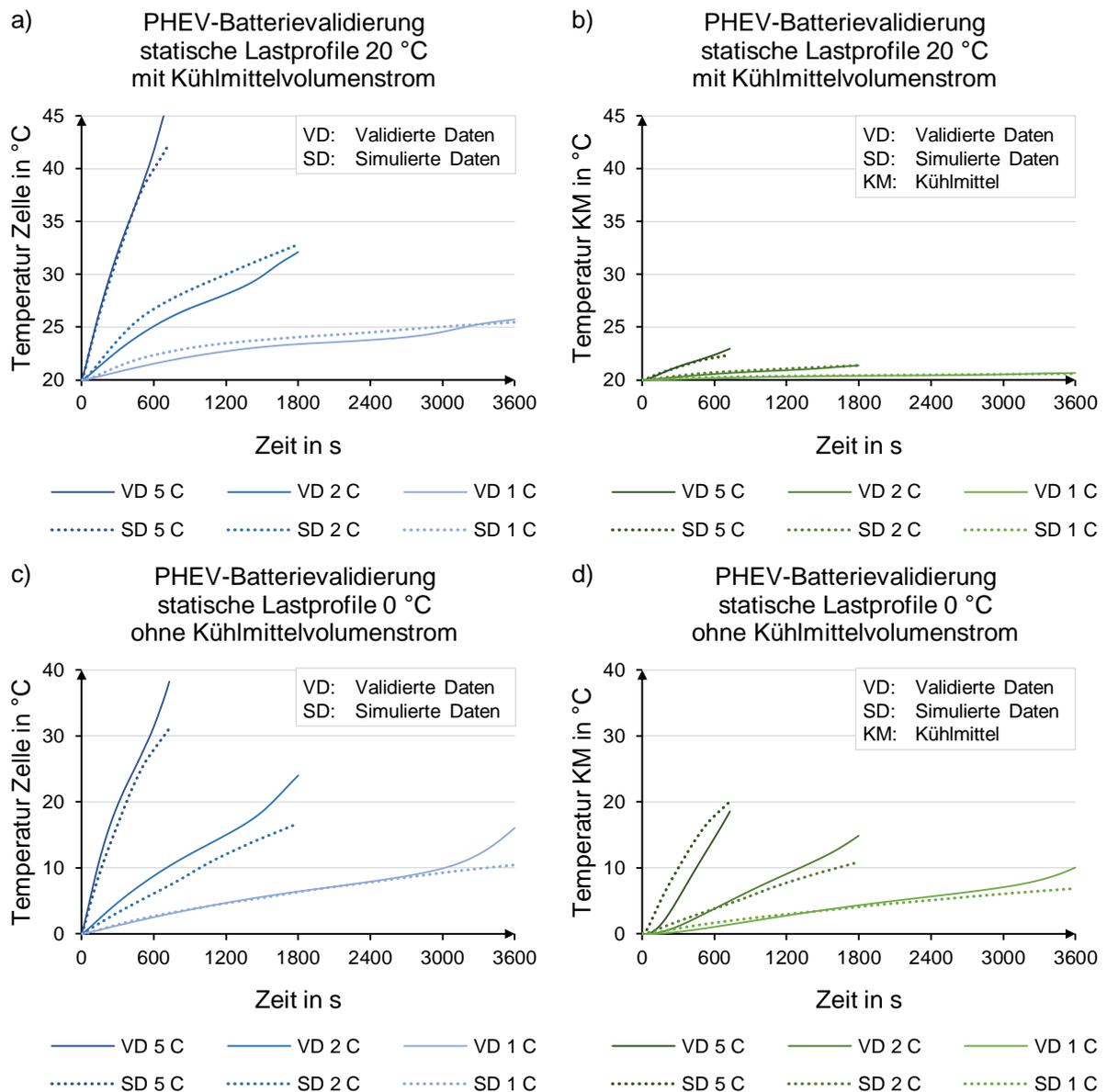


Abbildung 4-12 PHEV-Batterievalidierung statische Lastprofile 1 C, 2 C und 5 C Entladung a) und b) bei 20 °C mit Kühlmittelvolumenstrom und c) und d) bei 0 °C ohne Kühlmittelvolumenstrom

Die Weiteren betrachteten, stationären Lastfälle weisen einen ähnlichen Verlauf der Temperaturen auf. In dem Anhang 9 und in dem Anhang 10 sind die Ergebnisse der Endtemperaturen, der Temperaturdifferenzen und des Ladezustands nach einer Simulationsdauer von einer Stunde in der Form einer Übersichtstabelle hinterlegt. Aus der Tabelle in dem Anhang ist zu entnehmen, dass eine maximale Abweichung von 5,9 K bei einer Betrachtung mit Kühlmittelmassenstrom erreicht wird. Auf der niedrigen Differenz und dem damit geringen Einfluss auf den Energiebedarf basierend, wird das stationäre Verhalten des PHEV-Batteriesystems als valide angenommen.

Neben den stationären Lastfällen wird zudem das transiente Verhalten analysiert. Dazu wird analog dem Vorgehen des BEV/REEV-Batteriesystems vorgegangen und die zeitlichen Verläufe mit den Stromprofilen eines Mittelklassefahrzeugs in dem Innerorts-, in dem Außerorts- und in dem Autobahnprofil untersucht. Die Abbildung 4-13 visualisiert den Lastfall Außerorts mit Kühlmittelvolumenstrom. In der Darstellung a) ist der Verlauf der Temperatur der Zelle und in der Darstellung b) jener der Austrittstemperatur des Kühlmittels dargestellt. In der Abbildung a) ist zu erkennen, dass die simulierten Temperaturen der Zelle bei kalten Bedingungen etwas niedriger und bei wärmeren Randbedingungen etwas

höher sind. Das festgestellte Verhalten deutet darauf hin, dass die Temperaturabhängigkeiten der spezifischen Wärmekapazitäten, die Wärmeübergänge oder die spezifische Wärmekapazität nicht vollumfänglich abgebildet sind. Da die maximale Abweichung der validierten Werte bei einer Starttemperatur von -10 °C vorliegt, was einem nicht sehr häufig auftretenden Lastfall entspricht, und die Abweichung selbst nach 40 Minuten noch kleiner als 4 K ist, wird das thermische Verhalten der PHEV-Zelle für den Außerortszyklus als valide eingestuft.

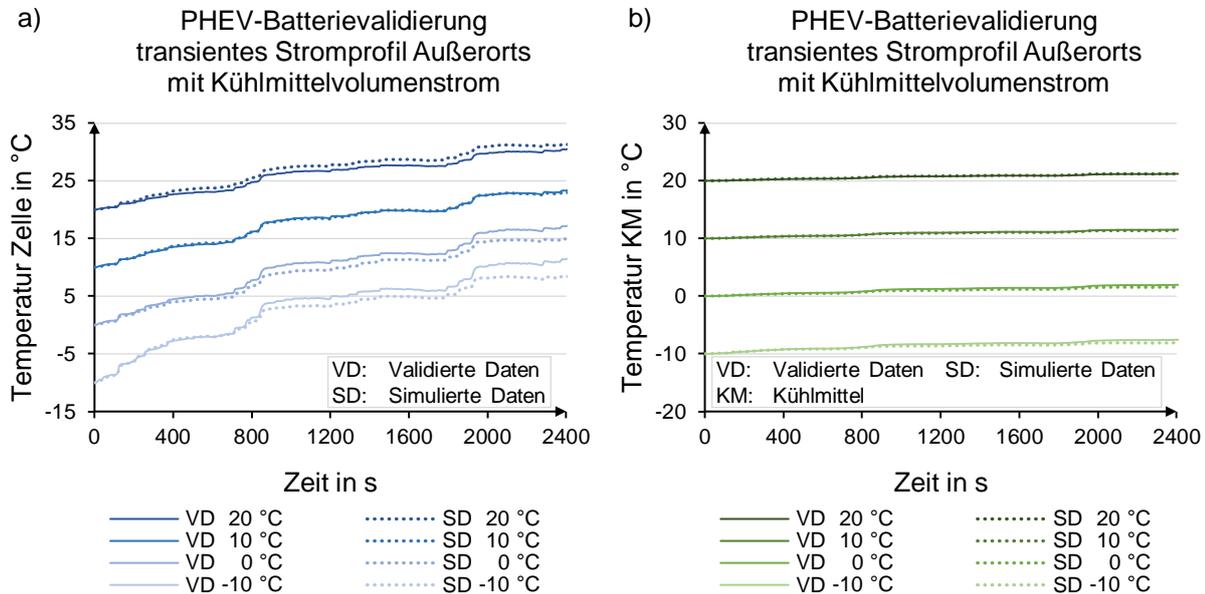


Abbildung 4-13 PHEV-Batterievalidierung transientes Stromprofil Außerorts bei unterschiedlichen Start- und Umgebungsbedingungen a) Zelltemperatur- und b) Kühlmitteltemperaturentwicklung

Bei der Betrachtung der anderen beiden, transienten Lastprofile, Innerorts und Autobahn, wird ebenfalls die beschriebene Temperaturabhängigkeit festgestellt. In dem Innerortszyklus ist die größte Differenz kleiner als 2,1 K und in dem Autobahnprofil ist jene kleiner als 4,2 K, vgl. Anhang 15 und Anhang 16. Aufgrund der beiden geringfügigen Temperaturunterschiede und dem damit verbundenen Einfluss auf den Energiebedarf wird das transiente Verhalten des PHEV-Batteriesystems als valide eingestuft.

Neben dem thermischen Verhalten wird zudem das elektrische Verhalten betrachtet. Da für beide Modelle ein identisches, elektrisches Ersatzschaltbild verwendet wird, stimmen die festgestellten Entladevorgänge überein, vgl. dazu Anhang 8, Anhang 9, Anhang 15 und Anhang 16. Das elektrische Verhalten ist somit ebenfalls valide.

Validierung des HEV-Batteriesystems:

Neben dem BEV-/REEV- und dem PHEV-Batteriesystem wird zudem ein HEV-Batteriesystem in verschiedenen Antriebsvarianten eingebaut. Der dabei verwendete Batterietyp wird folgend anhand des Abkühlverhaltens und anhand stationärer Lastfälle validiert.

Bei dem Abkühlverhalten werden der Verlauf der Temperatur der Zelle und jener der Austrittstemperatur des Kühlmittels anhand von zwei Abkühl Szenarien analysiert. Initial ist das Batteriesystem und das in dem Kühler enthaltene Kühlmedium auf 40 °C erwärmt. Während des Abkühlvorgangs wird das Batteriesystem mit einem Kühlmittelvolumenstrom mit einer konstanten Temperatur von 0 °C bzw. von 20 °C temperiert. Die Abbildung 4-14 stellt die resultierenden Temperaturverläufe des Simulationsmodells und des validierten Modells gegenüber. In dem Diagramm a) ist das Kühlmittel 0 °C warm und in dem Diagramm b) ist dieses 20 °C warm. In der Abbildung a) ist zu erkennen, dass das generelle Verhalten des Abkühlens bis etwa 1 200 s fast identisch und anschließend etwas zu warm abgebildet wird. Nach einer Stunde des Abkühlvorgangs stellt sich eine Abweichung kleiner als 4,2 K ein. Bei dem Abkühlverhalten

mit einem Kühlmittelvolumenstrom mit 20 °C ist ein identisches Verhalten feststellbar. In diesem Fall ist die finale Abweichung nach einer Stunde kleiner als 2,0 K. In beiden Darstellungen ist die Endtemperatur der Zelle etwas zu hoch und der Verlauf der Temperatur der Zelle etwas zu träge. Diese Feststellung deutet darauf hin, dass entweder die thermische Masse der Zelle zu groß oder die Wärmeanbindung etwas zu konservativ modelliert ist. Da die Abweichung nach einer Stunde aber weniger als 4,2 K beträgt, wird das Abkühlverhalten dennoch als valide betrachtet.

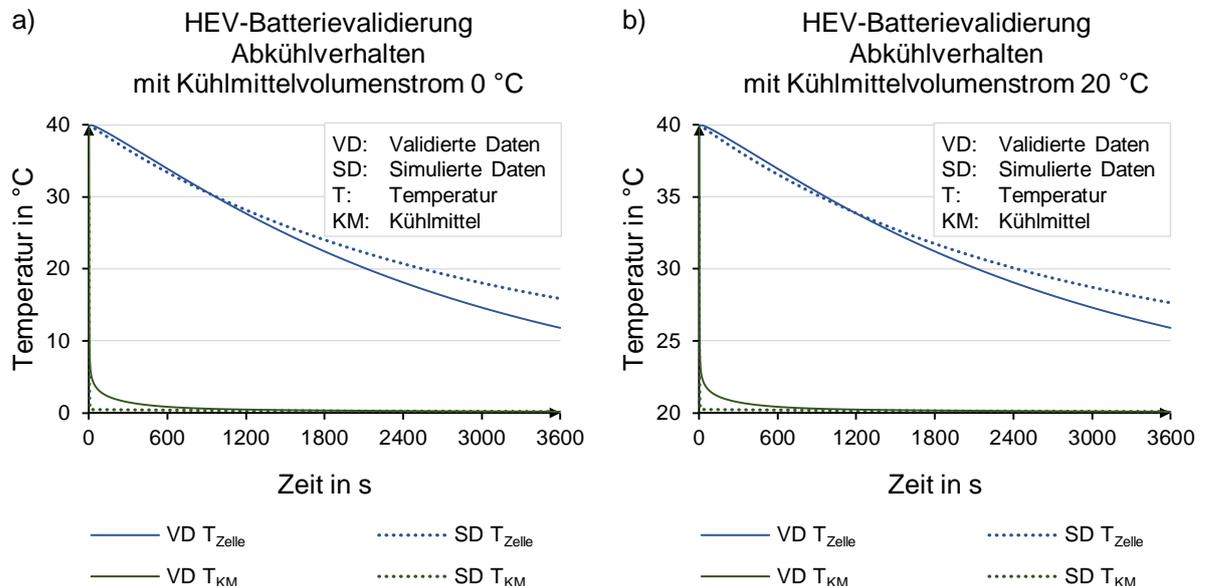


Abbildung 4-14 HEV-Batterievalidierung mit Kühlmittelmassenstrom a) Abkühlverhalten bei 0 °C und b) bei 20 °C

Neben dem Abkühlverhalten wird zudem das stationäre Verhalten unter Last verifiziert. Dabei wird, wie bei den anderen beiden Batterietypen, eine Temperaturspanne von -20 °C bis +30 °C in 10-Kelvin-Schritten betrachtet. Für die Validierung der HEV-Batterie wird eine Entladerate von 2 C, von 5 C und von 10 C mit und ohne Kühlmittelvolumenstrom analysiert. Die Abbildung 4-15 stellt beispielhaft das festgestellte Verhalten der Temperatur der Zelle und jenes der Austrittstemperatur des Kühlmittels bei 30 °C mit und bei 10 °C ohne Kühlmittelvolumenstrom dar. Aus den Abbildungen a) und c) ist zu entnehmen, dass der Verlauf der Temperatur der Zelle nahezu konstant abweicht. Bei einer Starttemperatur von 30 °C ist die festgestellte Temperaturdifferenz etwas stärker ausgeprägt. Bei einer Entladung mit 10 C und bei einer Entladung mit 5 C ist die Abweichung ca. 5 K, während bei einer Entladung mit 2 C diese ca. 4 K beträgt. In dem Fall einer Ausgangstemperatur von 10 °C ist ein ähnliches Verhalten mit einer größeren Differenz für 2 C und für 5 C erkennbar. Für 10 C trifft der simulierte den validierten Verlauf der Temperatur der Zelle gut. Da die Temperaturdifferenz zumeist konstant auftritt, kann als Ursache eine zu groß gewählte spezifische Wärmekapazität der HEV-Zelle oder ein zu gut modellierter Wärmeübergang des Kühlers genannt werden. Letzteres wird aufgrund des stationären Vergleichs ohne Last ausgeschlossen. In dem gesamten Temperaturspektrum, von -20 °C bis +30 °C, beträgt die Abweichung der Temperatur weniger als 7,2 K, siehe Anhang 11 und Anhang 12. Darauf basierend wird das Verhalten der Temperatur der Zelle trotz eines konstanten Versatzes als valide angenommen. In den Diagrammen b) und d) ist, in beiden Temperaturfällen, zu erkennen, dass die Kühlmitteltemperatur gut abgebildet wird.

Für den HEV-Batterietyp wird der Verlauf des Ladezustands ebenfalls analysiert. Dabei wird festgestellt, dass sich das elektrische Verhalten des Batteriesystems analog zu dem zu der Validierung dienenden Modell verhält, vgl. Anhang 11 und Anhang 12. Die ermittelte Übereinstimmung resultiert aus einer identischen Parametrierung des elektrischen Ersatzschaltbilds.

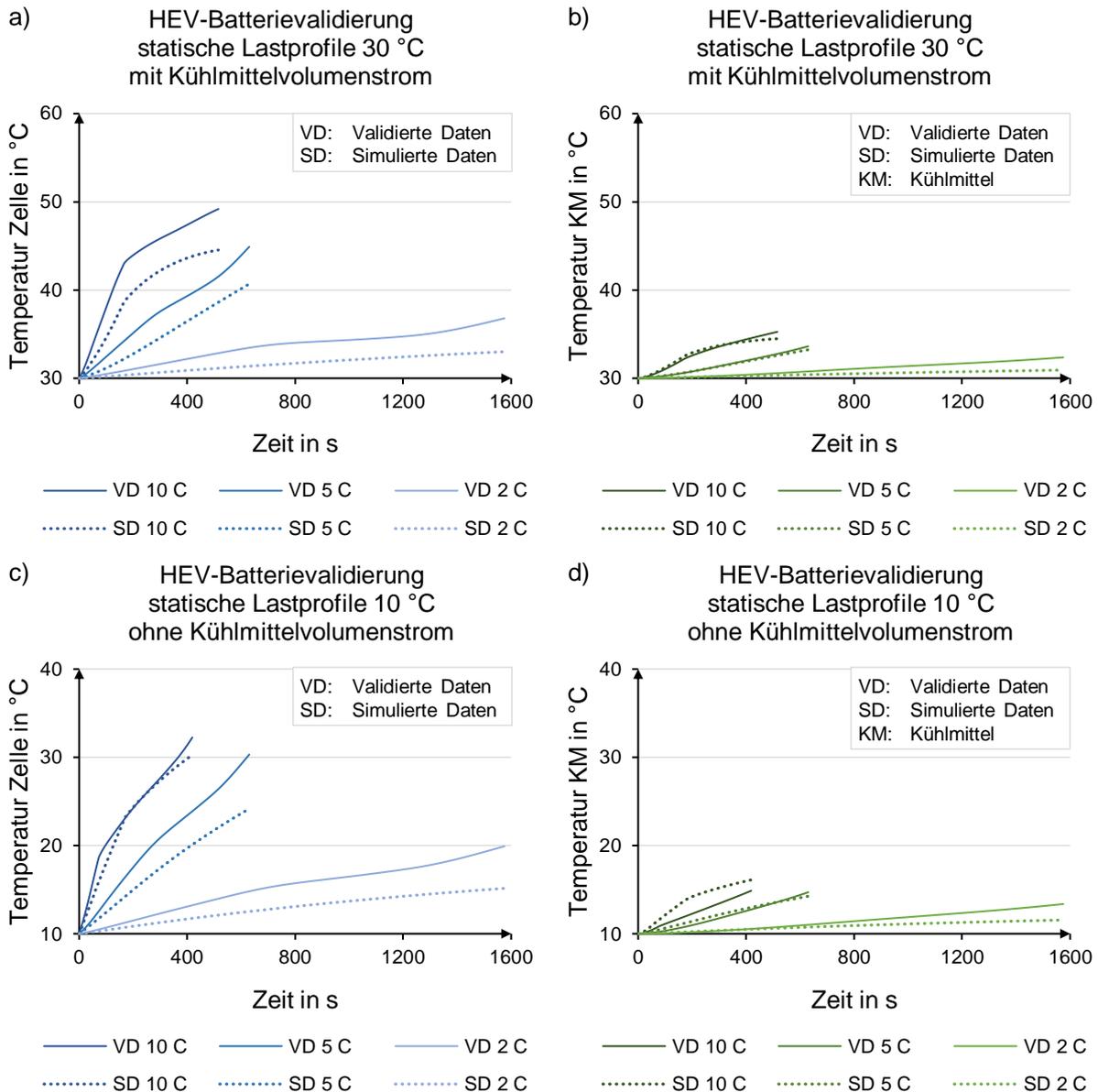


Abbildung 4-15 PHEV-Batterievervalidierung statische Lastprofile 2 C, 5 C und 10 C Entladung a) und b) bei 30 °C mit Kühlmittelvolumenstrom und c) und d) bei 10 °C ohne Kühlmittelvolumenstrom

4.2 Brennstoffzellensystem/-stack

Anstatt oder zusätzlich zu einem Batteriesystem kann als Energiespeicher bzw. als Energiewandler ein Brennstoffzellensystem (BZS) eingesetzt werden. Ein BZS ist, wie ein Batteriesystem, in vielen Antriebsformen verbaut und wird deshalb detailliert betrachtet. Folgend werden zunächst der Aufbau und die Modellierung des BZSs erklärt und anschließend wird die durchgeführte Validierung beschrieben.

Aufbau des Brennstoffzellensystems/-stacks:

Aufgebaut ist ein Brennstoffzellensystem in dem Pkw-Bereich wie in der Abbildung 2-15 auf der Seite 26 gezeigt. Die Hauptkomponente des Systems ist ein Brennstoffzellenstack. Neben einem Brennstoffzellenstack sind zudem ein elektrischer Turbolader (engl. electric turbo charger, ETC), ein Ladeluftkühler (LLK) und ein DC/DC-Wandler (engl. fuel cell converter, FCC) essenzielle Bestandteile eines BZSs. Die Systemeffizienz eines Brennstoffzellenaggregats setzt sich aus den einzelnen, leistungsspezifischen Effizienzen der Komponenten zusammen. Abgebildet wird dieses Zusammenspiel in dieser Arbeit kennfeldbasiert, wie in der Abbildung 4-16 gezeigt. Auf eine Leistungsanforderung nach dem FCC wird der

jeweilige Leistungsbedarf des elektrischen Turboladers lastpunktspezifisch aufgeschlagen und die Summe für die Berechnung des Wasserstoffmassenstroms, der Effizienz des Stacks und der Abwärme des Stacks, des LLKs und des ETCs verwendet. Die jeweilige Ausgabegröße wird über ein zweidimensionales Kennfeld (KF) ermittelt, welches zu dem einen die beschriebene Leistungsanforderung und zu dem anderen das ausgewählte BZS beinhaltet. Über die letztgenannte Vorgabe, „Wahl des BZS“, ist es möglich unterschiedliche Brennstoffzellensysteme bzw. -kennlinien in dem Modell zu hinterlegen, vgl. Abbildung 4-16 links oben. Mittels des KFs „Massenstrom H₂“ wird der aktuelle, lastabhängige Verbrauch an Wasserstoff ermittelt. Dieser wird anschließend integriert und sowohl der gesamte H₂-Verbrauch als auch der durchschnittliche Verbrauch an Wasserstoff über der Fahrstrecke errechnet. Die Leistung des Stacks wird anschließend mit einem, als konstant angenommenen, Wirkungsgrad von 98 % des FCCs verrechnet, um die Nettoleistung des BZSs zu ermitteln. Die Annahme einer konstanten Effizienz eines FCCs wird über die Kennfelder aus den Quellen [61] und [148] plausibilisiert. Aufgrund der verwendeten und in dem Abschnitt 5.2 nachfolgend detailliert erklärten Betriebsstrategie kann dies angewandt werden, da in dieser definiert ist, dass immer eine gewisse Mindestleistung über ein BZS bereitgestellt werden muss.

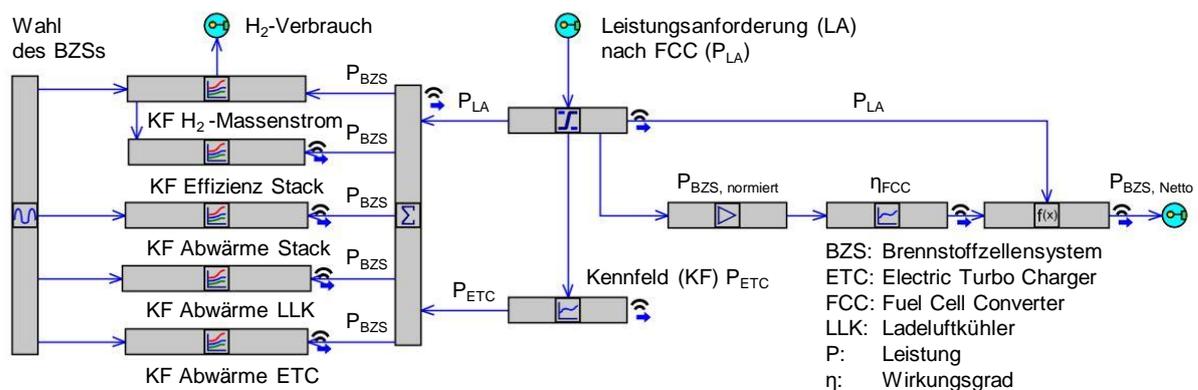


Abbildung 4-16 Modellierung des Brennstoffzellensystems, Bild aus [92]

Die, über die Kennfelder „Effizienz Stack“, „Abwärme Stack“, „Abwärme LLK“ und „Abwärme ETC“, situativ ermittelten Verlustleistungen bzw. Abwärmern, werden in dem Modell direkt weiterverarbeitet. Die entstehende Wärmeabgabe des LLKs wird dabei direkt in den Hochtemperaturkreislauf eingebracht. Die Verlustleistung des ETCs wird auf eine thermische Masse in den Niedertemperaturkreislauf des Elektromotors eingetragen. Die Materialeigenschaften, die Abmessungen und die Anbindungsflächen zu dem Kühlmittel entstammen real existierenden Bauteilen. Die physikalischen Eigenschaften werden segmentspezifisch, basierend auf dem Leistungsverhältnis des segmentspezifischen BZSs zu einem entsprechenden Referenzsystem, linear skaliert. Der Hauptwärmeanteil eines BZSs entsteht in dem Stack. Aus diesem Grund wird dieser folgend detailliert untersucht und beschrieben. Die Abbildung 4-17 a) zeigt den schematischen Aufbau eines Brennstoffzellenstacks. Der Brennstoffzellenstack ist mit einem Gehäuse, welches diesen schützt und gleichzeitig eine Tragstruktur bilden kann, zwei Medium-Verteil-Platten (MVP), mehreren MEAs und den dazwischen verbauten Bipolarplatten aufgebaut. Das Kühlmittel tritt in einer MVP ein, durchströmt die Bipolarplatten, beispielsweise in feinen Röhren, siehe Abbildung 4-17 b), und kühlt die MEAs. Da in den Letztgenannten die Energiewandlung abläuft, wird vereinfacht angenommen, dass der Hauptteil der Verlustleistung direkt in dieser aktiven Zone homogen entsteht. Für die Simulation wird die Bipolarplatte deshalb in drei Zonen, oberer Bereich, aktive Zelle und unterer Bereich, eingeteilt.

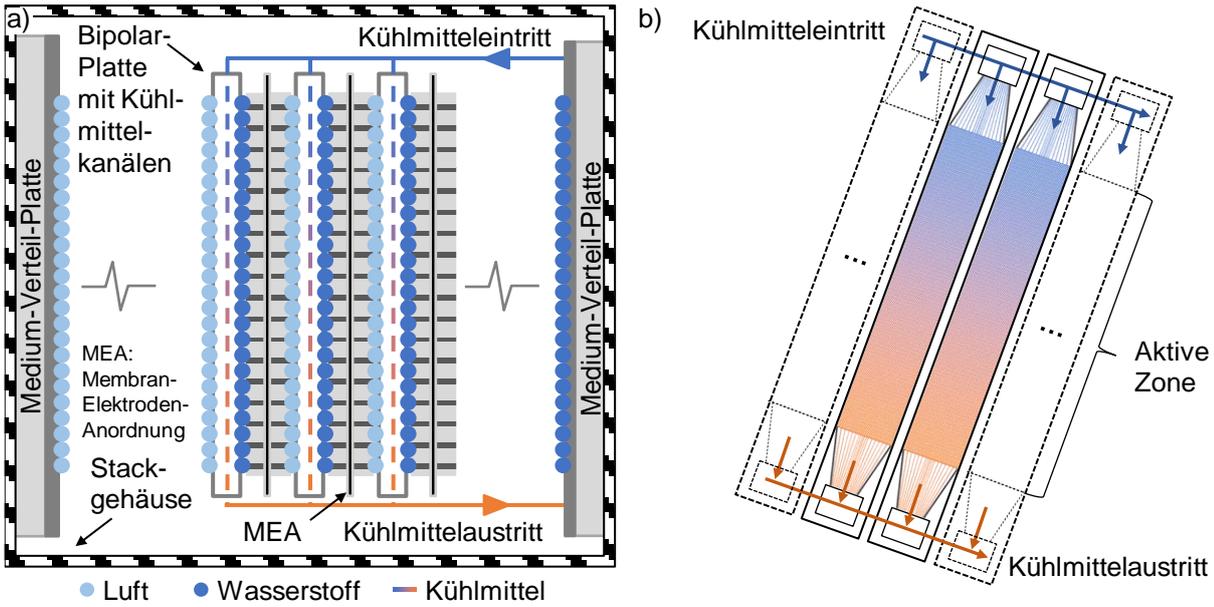


Abbildung 4-17 a) schematische Darstellung eines generellen Aufbaus eines Brennstoffzellenstacks nach [57] und b) detaillierte Visualisierung des Kühlmittelstroms durch die Bipolarplatten

Gesamtheitlich modelliert wird der Brennstoffzellenstack in der Simulationsumgebung GT-SUITE, wie in der Abbildung 4-18 visualisiert.

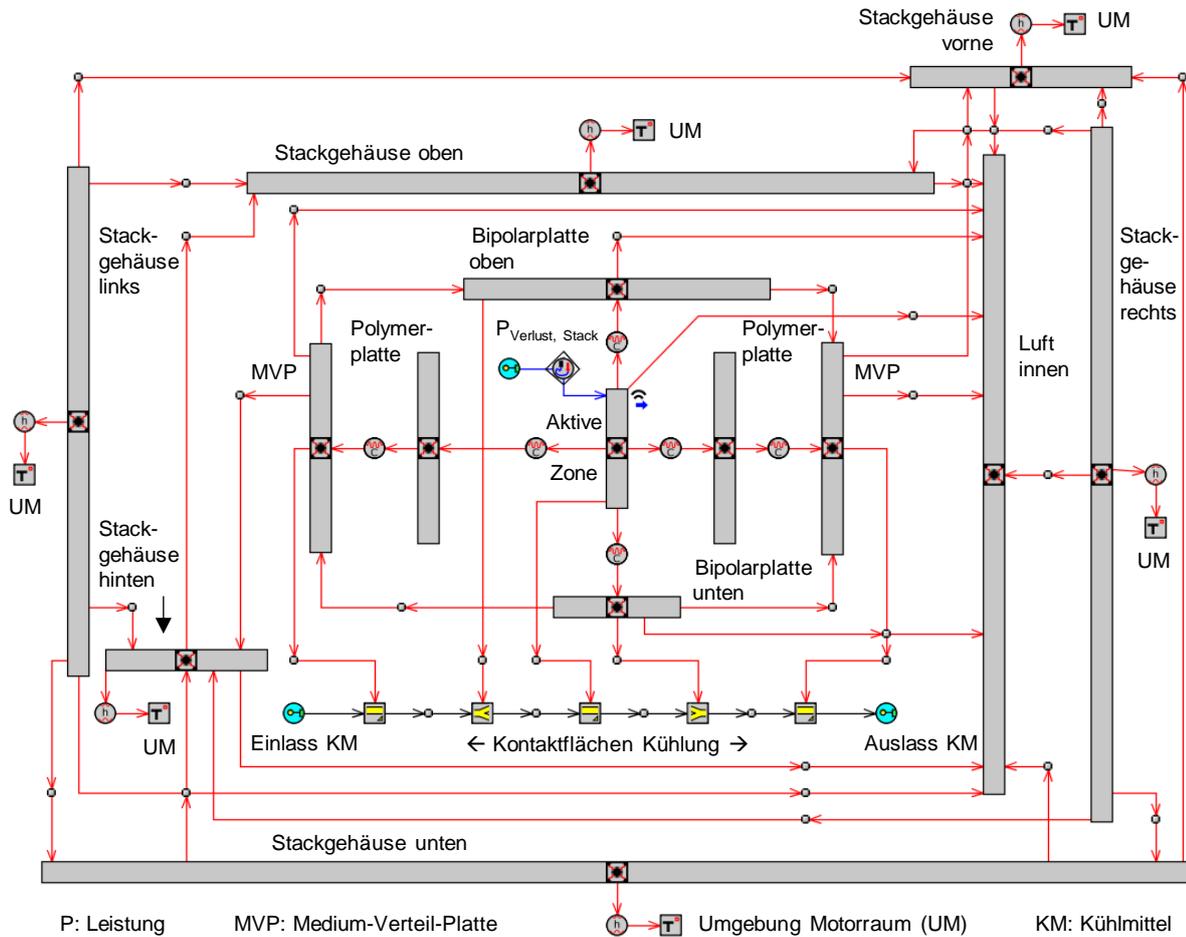


Abbildung 4-18 Modellierung des Brennstoffzellenstacks in GT-SUITE, Bild aus [92]

Die Verlustleistung des Brennstoffzellenstacks wird direkt auf den aktiven Bereich der Zelle aufgeprägt und von dort über die Wärmepfade über die Komponenten an die Kühlanbindungen weitergeleitet. Anzumerken ist dabei, dass die thermischen Massen und Kühlanbindungen der differenzierten Bauteile in einer Masse zusammengefasst sind. Dies stellt eine Vereinfachung dar, verringert jedoch die Rechenzeit und zeigt dennoch, wie in dem folgenden Unterkapitel dargestellt, eine gute Übereinstimmung zu den Messergebnissen. Umschlossen ist der Aufbau der Bipolarplatten, MEAs und MVPs mit einem Gehäuse. Dieses wird ebenfalls hinsichtlich der thermischen Eigenschaften modelliert und mittels einem konvektiven Wärmeübergang an die Luft in dem Motorraum angebunden. Als Lufttemperatur in dem Motorraum wird die Luftaustrittstemperatur nach dem Kühlmittelkühler des Hochtemperaturkreislaufs angenommen. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird analog jenem eines Verbrennungsmotors in einem Motorraum nach [175] geschwindigkeitsabhängig modelliert.

Validierung des Brennstoffzellensystems/-stacks:

Ein Großteil der Energiewandlung des BZSs läuft in dem Brennstoffzellenstack ab. Basierend auf dieser Erkenntnis, ist es essenziell, dass dieser detailliert analysiert und validiert wird. Mit dem Ziel dies umzusetzen, wird das thermische Verhalten über die Austrittstemperatur des Kühlmittels anhand von Messdaten eines realen Systemaufbaus [176] validiert. Für diesen Zweck werden drei unterschiedliche Lastfälle und Startbedingungen untersucht, um sowohl das stationäre als auch das transiente Verhalten des Systems über verschiedene Temperaturen zu prüfen. Das BZS des Teststands wird nachmodelliert, mit einem gemessenen Leistungsprofil beaufschlagt, die Eintrittstemperatur des Kühlmittels analog jener des Prüfstands vorgegeben und die Austrittstemperatur des Kühlmittels stellvertretend für die Verlustleistung bzw. den Wärmeeintrag des BZSs in das Kühlmittel als Validierungsgröße herangezogen.

Wie die Abbildung 4-19 auf der Seite 102 zeigt, folgt jene auf der Simulation basierende Austrittstemperatur des Kühlmittels bei a) einem Anfahrvorgang bei -10 °C , b) einem Anfahrvorgang bei 20 °C und c) bei einer statischen und einer dynamischen Last jener der Messung gut. In den beiden Betrachtungsfällen a) und b) ist ein geringer, anfänglicher Verzug der Austrittstemperatur des Kühlmittels erkennbar. Dies deutete darauf hin, dass entweder die thermische Wärmekapazität der MEAs zu groß, der Wärmeübergang in das Kühlmedium zu niedrig, die Wärmeanbindung zu der Umgebung zu gut, oder der nicht temperaturabhängig modellierte Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstacks in gewissen Bereichen zu gut angenommen ist. In dem zeitlichen Verlauf zeigt die Austrittstemperatur des Kühlmittels der Simulation und jene der Messung jedoch eine gute Übereinstimmung. Auf der guten Abbildung der Austrittstemperatur basierend wird davon ausgegangen, dass ein anfänglicher Fehler des Wärmeeintrags schnell kompensiert wird. Der festgestellte, initiale, thermische Verzug der Erwärmung des Kühlmittels könnte aufgrund der vereinfachten Modellierung der MEAs als Gesamtsystem auftreten. Da das stationäre und das transiente Verhalten der Kühlmittelaustrittstemperatur jedoch eine akzeptable Übereinstimmung zeigt, vgl. Abbildung 4-19 c), wird das thermische Verhalten des Brennstoffzellenstacks darauf basierend für eine Gesamtfahrzeugsimulation als valide bezeichnet.

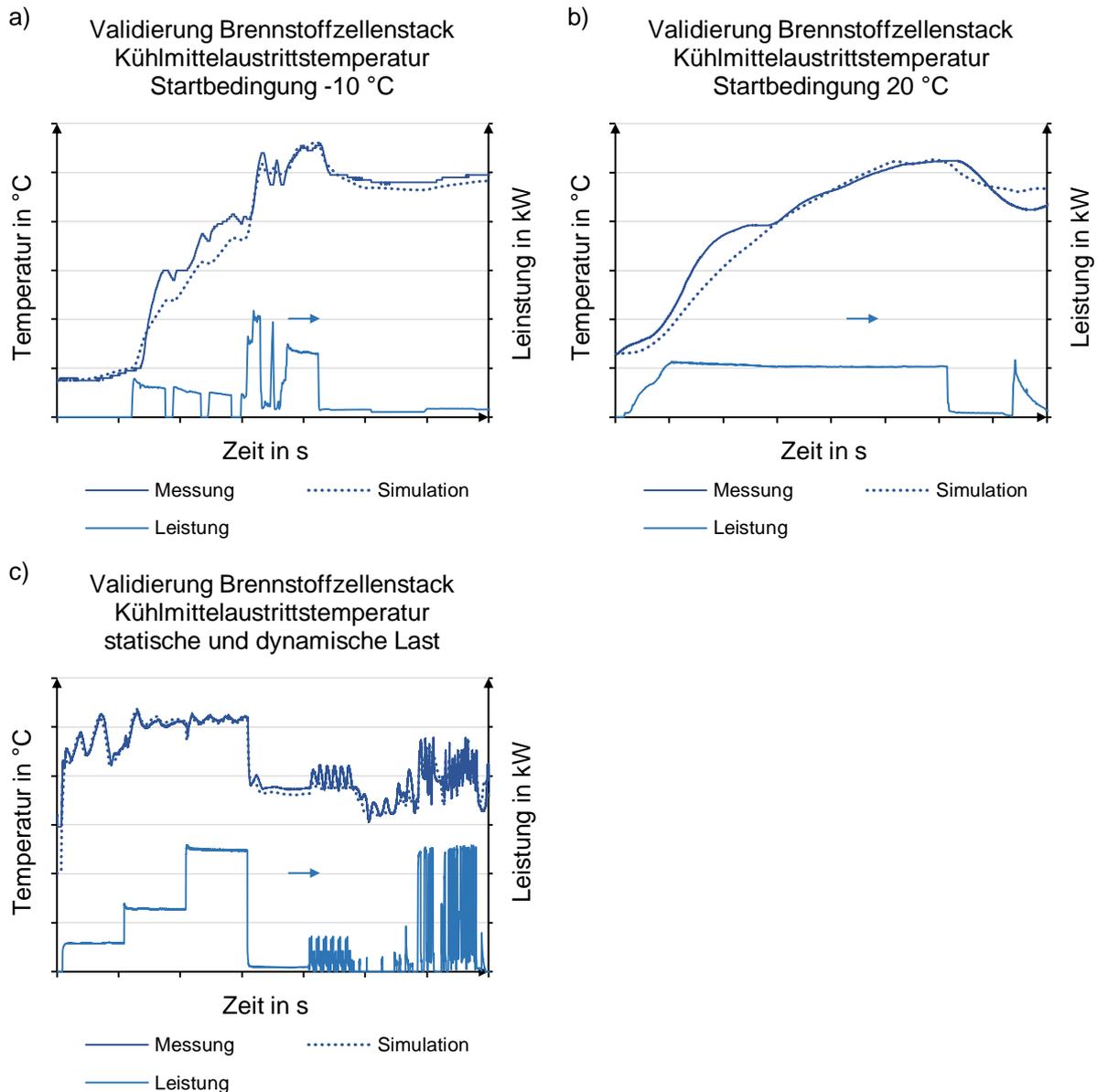


Abbildung 4-19 Validierung des thermischen Verhaltens der Austrittstemperatur des Kühlmittels eines Brennstoffzellenstacks bei a) -10 °C, b) 20 °C und c) statischer und dynamischer Last nach [70]

4.3 Elektrische Antriebseinheit

Die von den bereits gezeigten Energiespeichern und Energiewandlern, Batterie- und BZS, bereitgestellte, elektrische Leistung wird bei alternativen Antrieben über eine elektrische Antriebseinheit in eine mechanische Antriebsleistung umgewandelt. Der prinzipielle Aufbau, die simulative Approximation und die Validierung des thermischen Verhaltens der elektrischen Antriebseinheit werden folgend beschrieben.

Aufbau der elektrischen Antriebseinheit:

Die Abbildung 2-27 auf der Seite 34 stellt den schematischen Aufbau der in dieser Arbeit verwendeten elektrischen Antriebseinheiten dar. Die elektrische Antriebseinheit besteht im Wesentlichen aus einer Leistungselektronik - dem Inverter, einem Elektromotor und einem Getriebe. Die Leistungselektronik regelt die elektrische Maschine, welche über eine Übersetzungsstufe und über ein Differenzialgetriebe die Reifen und somit das Fahrzeug antreibt bzw. abbremst. Der Elektromotor, vereinfacht model-

liert, besteht aus einer Hohlwelle, einem Rotor, einem Stator und einem Gehäuse, welches die Komponenten umschließt. Das Gehäuse des Elektromotors besitzt nach außen Kühlrippen für die Wärmeabfuhr nach außen und bildet in dem Verbund mit dem Stator Kühlwicklungen innen für die Wärmeabfuhr in das Kühlmittel. Der Inverter ist bei dem modellierten Aufbau an dem Gehäuse des Elektromotors montiert. Auf der Hohlwelle des Elektromotors ist ein Zahnrad befestigt, welches das Antriebs- bzw. das Abbremsmoment mittels einer Übersetzungsstufe und einem Differenzialgetriebe an die Reifen überträgt. Für die Kühlung der Leistungselektronik und jener des Stators der elektrischen Maschine wird eine serielle Kühlmitteldurchströmung realisiert. Dabei wird als Erstes, aufgrund einer höheren Temperatursensibilität, der Inverter und anschließend der Elektromotor mit Kühlmittel durchflossen. Neben einer Kühlung der Leistungselektronik und des Stators mittels Kühlmittel ist in diesem Beispiel zudem eine Ölkühlung, welche das Getriebe und die Hohlwelle von innen temperiert, implementiert. Modelliert wird die Leistungselektronik wie in der Abbildung 4-20 veranschaulicht. Die elektrische Leistung des elektrischen Antriebssystems wird mit einem Wirkungsgrad des Inverters verrechnet und die daraus resultierende Verlustleistung der thermischen Masse der Leistungselektronik aufgeprägt. Die Bauteile der Leistungselektronik werden vereinfacht als eine Masse abgebildet. Die Ermittlung des Wirkungsgrads erfolgt kennfeldbasiert in Abhängigkeit der aktuellen Motordrehzahl und der relativen Auslastung. Durch diese Art der Modellierung wird trotz einer für eine Gesamtfahrzeugsimulation notwendigen Vereinfachung versucht, eine spezifische Auslastung als Einflussparameter generisch zu berücksichtigen. Das dabei als Grundlage dienende Wirkungsgradkennfeld entstammt einem Datenblatt der Firma BRUSA Elektronik AG [177].

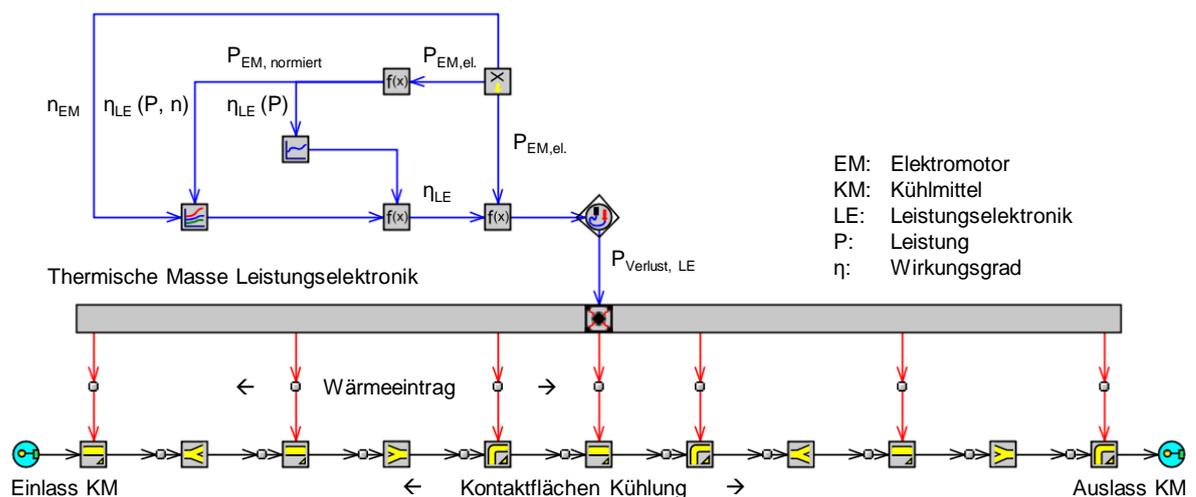


Abbildung 4-20 Modellierung einer Leistungselektronik in GT-SUITE, Bild aus [92]

Der Kühler der Leistungselektronik wird, wie bereits erwähnt, mit Kühlmittel durchflossen und ist über definierte Kontaktflächen mit dem Inverter verbunden. Der modellierte Aufbau und die Abmessung der Kühlflächen, beispielsweise jene des Leistungsmoduls und jene des Zwischenkreiskondensators, entstammen einem real verbauten Wechselrichter. Sowohl die Skalierung der Eigenschaften der Kühlung als auch jene der thermischen Massen der Leistungselektronik auf die unterschiedlichen, segmentspezifischen Antriebseinheiten erfolgt segmentspezifisch anhand des Verhältnisses der segmentspezifischen, maximalen, mechanischen Ausgangsleistung des Elektromotors zu einem Referenzsystem.

Der Elektromotor wird nachfolgend der Leistungselektronik mit Kühlmittel durchflossen und wird, wie in der Abbildung 4-21 auf der Seite 104 visualisiert, in der Simulationsumgebung GT-SUITE aufgebaut. Der in der Darstellung links oben gezeigte Einlass des Kühlmittels entspricht dem Auslass des Kühlmittels des Inverters. Nach dem Eintritt in den Elektromotor strömt das Kühlmittel durch die Kühlwicklungen des Stators und temperiert so den Elektromotor von außen. Die Verlustleistung des Elektromotors wird auf den Stator und den Rotor aufgeteilt. Dabei wird vereinfacht ein konstantes Verhältnis der Aufteilung der Verlustleistung verwendet. Dieses wird über die Analyse von Messdaten empirisch ermittelt. Die

sich aufgrund der unterschiedlichen Wärmeeinträge ergebenden Temperaturen der Komponenten führen folglich zu unterschiedlichen Wärmeströmen. Wie bereits in den Grundlagen beschrieben, führt eine Temperaturdifferenz zu einer Wärmeleitung, einer Wärmestrahlung oder einer Wärmekonvektion. In der Modellierung der elektrischen Antriebseinheit sind die Wärmeleitung und die Wärmekonvektion berücksichtigt, da der Einfluss der Wärmestrahlung bei niedrigen Temperaturdifferenzen als gering bewertet wird. Ein Wärmestrom wird somit zu dem einen über die Luft in dem Elektromotor und um das Gehäuse und über das Kühlmittel konvektiv abgegeben. Zu dem anderen erfolgt ein Wärmefluss über eine Wärmeleitung zwischen den einzelnen Komponenten. Der Stator ist mit dem Gehäuse und der Rotor mit der Hohlwelle wärmeleitend verbunden. Ein Zahnrad ist zudem auf die Welle des Rotors aufgedrückt und damit ebenfalls wärmeleitend verbunden. Das Zahnradpaar der elektrischen Antriebseinheit wird in dem Betrieb erwärmt. In der Simulation sind vereinfacht die dabei auftretenden Verluste des Getriebes mit einer 50/50-Aufteilung auf die beiden Zahnräder berücksichtigt. Die Kühlung der Übersetzungsstufe und jene der Hohlwelle erfolgt leistungsabhängig. Neben der Öl- und der Kühlmittelkühlung wird das Gehäuse durch eine Anbindung an die Umgebungsluft in dem Motorraum temperiert. Die Berechnung des Wärmeübergangs erfolgt analog der Annahme bei der Modellierung des Brennstoffzellenstacks. Als Umgebungstemperatur wird die Luftaustrittstemperatur nach dem Hochtemperaturkühler verwendet und der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird nach [175] geschwindigkeitsabhängig modelliert.

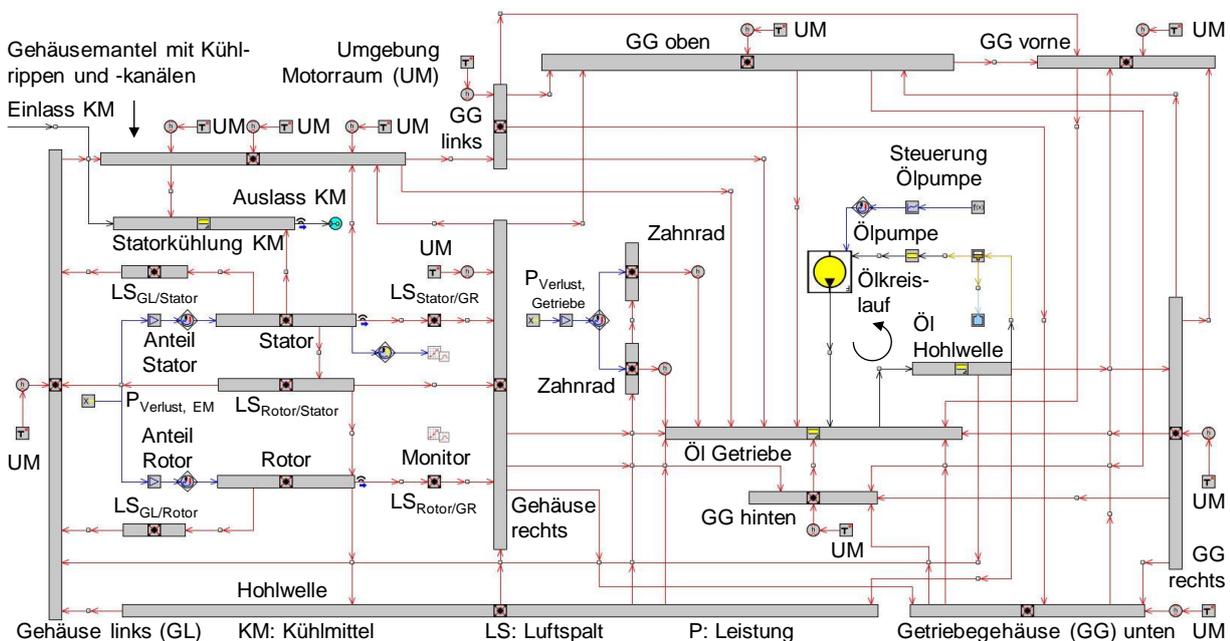


Abbildung 4-21 Modellierung einer elektrischen Antriebseinheit in GT-SUITE, Bild aus [92]

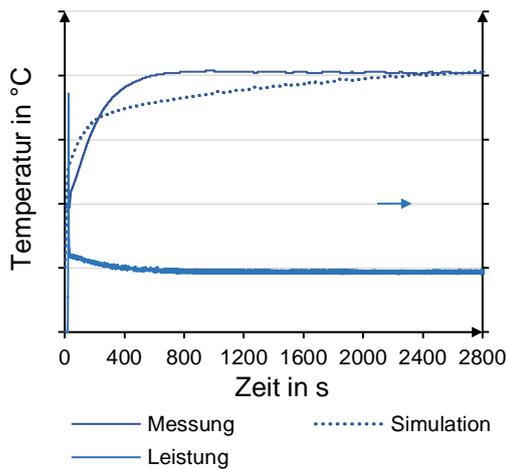
Validierung der elektrischen Antriebseinheit:

Für die Validierung der elektrischen Antriebseinheit (EAE) wird ein bestehender, vermessener Aufbau [178] herangezogen. Die EAE der verwendeten Messungen wird in dem Simulationsmodell GT-SUITE nachgebaut, mit den Rahmenbedingungen der Messung, wie beispielsweise mit der gemessenen Eintrittstemperatur des Kühlmittels und dem Leistungsverlauf, parametrisiert, simuliert und die Austrittstemperatur des Kühlmittels, stellvertretend für das thermische Verhalten, mit den Messwerten verglichen. Bei den für die Validierung der EAE herangezogenen Messungen, vgl. Abbildung 4-22 auf der Seite 105, handelt es sich, um zwei stationäre Lastfälle, vgl. Diagramm a) und Diagramm b) und zwei transiente Leistungsverläufe, vgl. Diagramm c) und Diagramm d).

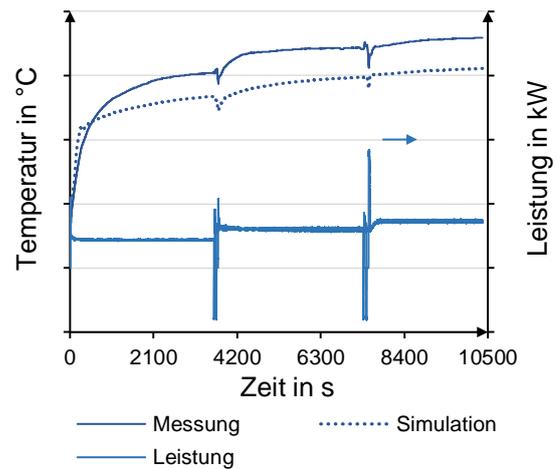
Bei einem Abgleich der gemessenen zu den simulierten Werten in dem Diagramm a) ist zunächst ein etwas zu langsamer Anstieg der Austrittstemperatur des Kühlmittels gefolgt von einem thermischen Verzug mit einem noch nicht komplett stationären Verhalten bei ca. 2 800 s zu erkennen. In der Mes-

sung b) sind ein anfänglicher rapider Anstieg und anschließend eine nahezu konstante Differenz zwischen der Austrittstemperatur des Kühlmittels der Messung und jener der Simulation von ca. 5 K erkennbar. In dem Betrachtungsfall c) tritt am Ende der Messung ebenfalls eine Temperaturabweichung von ca. 5 K bei einer konstanten Last auf. In dem davorliegenden Zeitbereich jenes Szenarios stimmt die simulierte Austrittstemperatur des Kühlmittels in dem dynamischen, sowie in dem darauffolgenden statischen Bereich, welcher einen Abkühlvorgang widerspiegelt, hinreichend genau überein. In dem komplett dynamischen Lastfall, Diagramm d), ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung in dem transienten Abschnitt erkennbar. Lediglich in den letzten 400 s tritt eine konstante Abweichung von ca. 3 K auf.

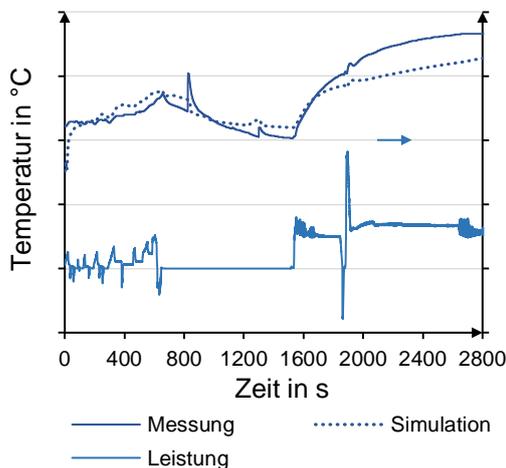
a) Validierung elektrische Antriebseinheit
Kühlmittelaustrittstemperatur
statische Last



b) Validierung elektrische Antriebseinheit
Kühlmittelaustrittstemperatur
statische Last



c) Validierung elektrische Antriebseinheit
Kühlmittelaustrittstemperatur
statische und dynamische Last



d) Validierung elektrische Antriebseinheit
Kühlmittelaustrittstemperatur
dynamische Last

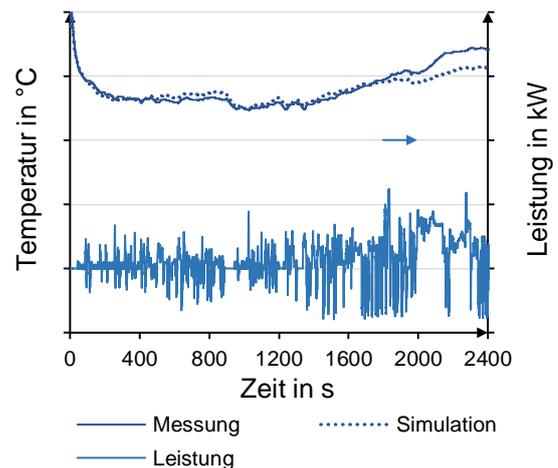


Abbildung 4-22 Validierung des thermischen Verhaltens der Austrittstemperatur des Kühlmittels der elektrischen Antriebseinheit bei a) einer statischen Last, b) unterschiedlichen statischen Lasten, c) statischer und dynamischer Last und d) dynamischer Last nach [70]

Der thermische Verzug und das noch nicht komplett stationäre Verhalten der Messung a) deuten auf eine zu hohe thermische Masse des Stators und eine zu geringe Wärmeabgabe an die Umgebung oder auf einen zu hohen Anteil der Verlustleistung in den Rotor und einer damit verbundenen, verzögerten Temperaturabgabe in das Kühlmittel hin. Die konstante Temperaturdifferenz in dem stationären Bereich der Messung b) und der Messung c) weist auf einen in diesen Lastfällen zu geringen Wärmeeintrag in

den Stator, auf eine zu hohe (einzelne) thermische Masse des Stators oder auf eine zu hohe konvektive Wärmeabgabe zu der Umgebung hin. Das transiente Verhalten der Austrittstemperatur des Kühlmittels in dem Diagramm c) und in dem Diagramm d) wird von der Simulation ausreichend gut abgebildet. Hier zeigt sich in dem gesamten Zeitverlauf lediglich eine geringe Abweichung. In der Messung c) ist die Abweichung der simulierten zu der gemessenen Austrittstemperatur des Kühlmittels bei dem Start der Messung bemerkenswert. Dies lässt auf eine höhere, als angenommen, anfängliche Temperatur des Motors und einem damit sehr warmen Kühlmittel in den Kühlwicklungen des Stators schließen. Zudem treten in der Messung c) zwei Sprünge der Austrittstemperatur des Kühlmittels bei ca. 800 s und bei ca. 1350 s auf. Da zu diesem Zeitpunkt keine Leistung von der EAE abgefragt wird, deutet dies auf einer Ventilumschaltung des Kühlmittels, eine Bereichsumschaltung des Kühlmittelsensors oder auf eine Entladung über einen thermisch an das Kühlmittel angebindenen Entladewiderstand der in dem Elektromotor gespeicherten Energie hin. Generell ist bei der Validierung des thermischen Verhaltens der EAE darauf hinzuweisen, dass aufgrund der starken Vereinfachung des thermischen Aufbaus nur der Wärmeeintrag in das Kühlmittel annähernd adäquat abgebildet werden kann. Lokal auftretende Temperaturen können mit diesem Modell nicht repräsentiert werden.

Da aufgrund fehlender Informationen über Betriebspunktabhängige Leistungsverteilungen eine statische Verteilung der Verlustleistung angenommen werden musste und die thermischen Massen und Abmessungen lediglich auf Angaben der Fachabteilung basieren und nicht direkt aus CAD⁴⁰-Daten entnommen werden konnten, ist das erzielte Ergebnis der Abbildung des thermischen Verhaltens der elektrischen Antriebseinheit trotz der getroffenen Vereinfachungen ausreichend genau. Folglich wird dieses für eine Gesamtfahrzeugsimulation als valide angenommen.

Für die Validierung des thermischen Verhaltens der EAE standen ausschließlich Daten einer Asynchronmaschine (ASM) zu der Verfügung. In der Gesamtsimulation wird jedoch eine permanent erregte Synchronmaschine (PSM) verwendet. Aufgrund von fehlenden Daten wird vereinfacht angenommen, dass der Wärmeübergang in das Kühlmittel und jener zu der Umgebung durch die gezeigte Validierung auch für diesen Maschinentyp valide ist. Basierend auf einem ähnlichen Aufbau der Kühlung sollte dies nahezu zutreffend sein. Die Verteilung der Verlustleistung auf den Rotor und auf den Stator wird angepasst, da die Rotorverluste einer PSM aufbaubedingt geringer ausfallen. Hierzu werden Angaben aus der Quelle [179] herangezogen. Zudem werden in der Simulation Massenänderungen über die verwendeten Leistungsdichten, vgl. Kapitel 3.3.4 auf der Seite 80, berücksichtigt.

4.4 Verbrennungsmotor

Neben den alternativen Komponenten wird häufig auch ein Verbrennungsmotor für die Energiewandlung in einem Pkw verwendet. Dieser muss ebenfalls möglichst detailliert modelliert werden, um die damit verbundene Energieumsetzung und dessen Wirkungsgrad situativ abzubilden. In dem Kontext einer Gesamtfahrzeugsimulation erlaubt die Rechenzeit jedoch keine winkelaufgelöste und damit sehr exakte Verbrennungsanalyse. Aufgrund der resultierenden Einschränkung wird deshalb auf eine kennfeldbasierte Simulation zurückgegriffen. Folgend werden der dazu gewählte Aufbau und die daraus resultierende Genauigkeit beschrieben. Der Aufbau und die Validierung des Verbrennungsmotors erfolgte in Zusammenarbeit mit der betreuten Studienarbeit [170].

Aufbau des Verbrennungsmotors:

Aufgebaut ist der simulierte Verbrennungsmotor mit einem Mehr-Massen-Modell, welches sowohl feldgenannte Massen als auch die Anbindung des Systems zu der Umgebung und deren thermische Wechselwirkungen beachtet. Als thermische Massen werden der Zylinderkopf, der Motorblock, das Kurbelgehäuse, die Kurbelwelle, der Massenanteil des Motorblocks, welcher in einem direkten Kontakt zu dem Wärmeeintrag und zu dem Kühlmittel steht, und der Massenanteil des Kurbelgehäuses, welcher in einem direkten Kontakt zu dem Wärmeeintrag und zu dem Öl steht, berücksichtigt. Zudem werden die

⁴⁰ CAD: Akronym. Engl. computer-aided design; z. Dt. Computerunterstütztes Design.

beiden Kühlmedien Kühlmittel und Öl modelliert. Die Abbildung 4-23 stellt die verwendete Modellierung dar. Der darin gezeigte Aufbau entstammt einer Vorlage der genutzten Simulationssoftware [92]. Dieser wird über die in dem Kapitel 3 ermittelten Angaben realitätsnah parametrisiert.

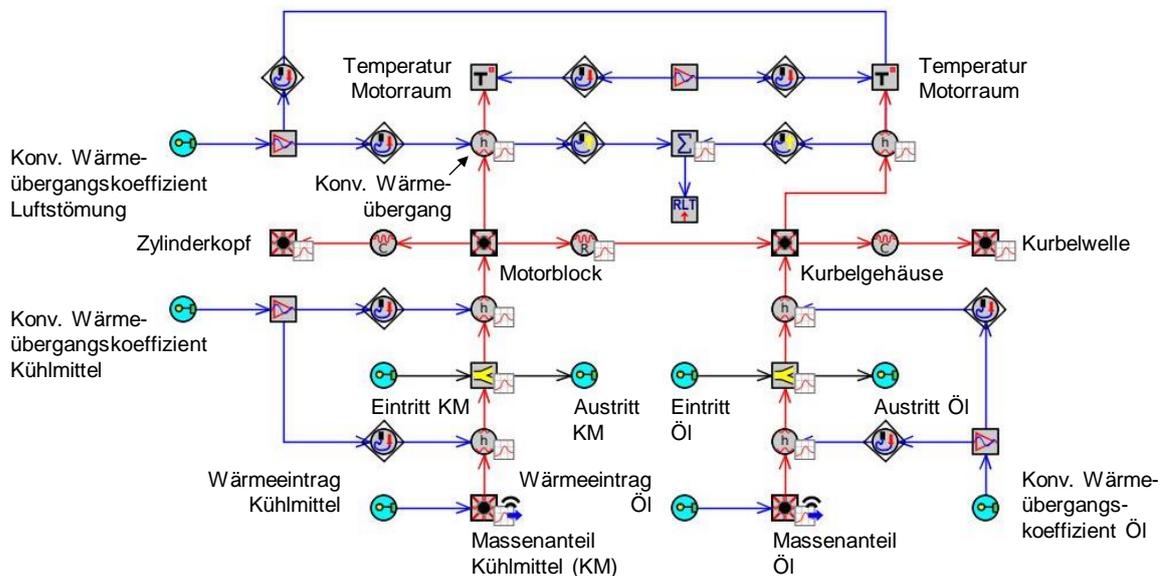


Abbildung 4-23 Modellierung des ICE-Mehr-Massen-Modells, vgl. das GT-SUITE-Template [92]

Die Parametrierung der thermischen Massen erfolgt jeweils fahrzeugspezifisch. Die Massen und die Abmessungen der einzelnen Motoren werden diesbezüglich aus den Datenbanken [38] und [101] entnommen und mit jener in der Referenzfahrzeugbildung beschriebenen Methodik, gewichtet. Die Anbindeflächen und das Volumen der Kühlmedien werden, aufgrund fehlender CAD- oder CFD⁴¹-Modelle, aus Schnittdarstellungen von Referenzmotoren, welche ebenfalls für die Kennfelderstellung herangezogen werden, aus der Quelle [180] herausgemessen. Für die Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangs des Öls und jenem des Kühlmittels wird jeweils ein Ersatzrohr basierend auf den gemessenen Volumen und der gemessenen Oberfläche verwendet. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zu der Umgebung wird in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit modelliert. Dabei wird ein, in [175] ermittelter, geschwindigkeitsabhängiger konvektiver Wärmeübergangskoeffizient bei einem eingeschalteten Lüfter verwendet. Für die Lufttemperatur des Motorraums wird in diesem Zusammenhang die Temperatur nach dem Hochtemperaturkühler angenommen. [170]

Die Wärmeströme in das Kühlmittel, in das Öl und in das Abgas sowie die Motorreibung müssen situativ abgebildet werden, um den benötigten Kraftstoffverbrauch eines Motors realitätsnah, beispielsweise bei einem Kaltstart, zu modellieren. Der Einfluss der Reibung des Motors wird unter anderem in [181]–[183] untersucht. In den genannten Veröffentlichungen wird festgestellt, dass der Reibmitteldruck bei einer abnehmenden Öltemperatur ansteigt. Begründet wird dies mit dem Zusammenhang einer ansteigenden Ölviskosität bei niedrigen Öltemperaturen. In [183] haben Shayler et al. das Verhalten der gesamten Motorreibung während des Warmlaufs untersucht und die Korrelation

$$P_{\text{Reibung}}(T_{\dot{\text{O}}1}) = P_{\text{Reibung}}(T_{\dot{\text{O}}1,\text{warm}}) \cdot \left(\frac{\nu_{\dot{\text{O}}1}(T_{\dot{\text{O}}1})}{\nu_{\dot{\text{O}}1}(T_{\dot{\text{O}}1,\text{warm}})} \right)^{0,24} \quad (4-1)$$

als gute Approximation der Messdaten gezeigt. Dabei haben Shayler et al. die momentane Reibleistung $P_{\text{Reibung}}(T_{\dot{\text{O}}1})$ in Abhängigkeit der Öltemperatur $T_{\dot{\text{O}}1}$ bzw. der Ölviskosität $\nu_{\dot{\text{O}}1}$ und der Reibleistung bei einem warmen Motor $P_{\text{Reibung}}(T_{\dot{\text{O}}1,\text{warm}})$ durch eine Exponentialfunktion mit einem Exponenten von 0,24

⁴¹ CFD: Akronym. Engl. computational fluid dynamics; z. Dt. Numerische Strömungssimulation.

beschrieben und eine gute Übereinstimmung festgestellt. Erhöht oder verringert sich die Öltemperatur bzw. die Ölviskosität, erniedrigt oder erhöht sich die Reibleistung durch eine Multiplikation der betriebswarmen Reibleistung mit einem Faktor, welcher sich aus dem Verhältnis der aktuellen zu der betriebswarmen Ölviskosität exponenziert mit 0,24 zusammensetzt. Basierend auf einer guten Deckung der Funktion mit den Messdaten aus [183] wird angenommen, dass die Reibleistung des Motors bei einem Warmlauf mit der Gleichung 4-1 in dem Zusammenhang einer Gesamtfahrzeugsimulation ausreichend genau abgebildet wird. Anzumerken ist jedoch, dass die Reibleistung nicht bei allen Komponenten mit einer steigenden Öltemperatur abnimmt. Die Reibung des Ventiltriebs ist nach [182] nahezu unabhängig von der Öltemperatur und steigt bei sehr hohen Temperaturen sogar leicht an. Aufgrund des geringen Anteils der Reibung des Ventiltriebs an der gesamten Reibung kann die Annäherung dennoch angewendet werden. [170]

Neben dem Einfluss der Reibung werden auch die Wärmeströme in das Kühlmittel, in das Öl und in das Abgas situativ bestimmt, um eine möglichst genaue Ermittlung des Kraftstoffbedarfs abzubilden. Für die Ermittlung der Wärmeströme in das Kühlmittel und in das Öl wird ein Gradienten-Kennfeld eines innerhalb der Firma Daimler AG vermessenen Motors verwendet [184]. Ein Gradienten-Kennfeld wird dabei wie folgend beschrieben aufgenommen. Zunächst wird über das gesamte Motorkennfeld bei definierten Fluidtemperaturen der Wärmeeintrag in das Kühlmittel \dot{Q}_{KM} und jener in das Motoröl $\dot{Q}_{\dot{O}1}$ bestimmt. Anschließend werden über die einströmenden Temperaturen der beiden Medien die Austrittstemperaturen einzeln variiert, wobei das jeweils andere Kühlmedium seine Temperatur hält. Basierend auf der Variation der Medientemperaturen ändert sich der Wärmeeintrag in das Kühlmittel bzw. in das Öl und die Gradienten $\frac{\partial \dot{Q}_{KM}}{\partial T_{KM}}$, $\frac{\partial \dot{Q}_{\dot{O}1}}{\partial T_{KM}}$, $\frac{\partial \dot{Q}_{\dot{O}1}}{\partial T_{\dot{O}1}}$ und $\frac{\partial \dot{Q}_{KM}}{\partial T_{\dot{O}1}}$ können berechnet werden. Mit einem Basiswärmeeintrag bei einer definierten Temperatur und den festgestellten Gradienten kann somit für jede Kühlmittel- und für jede Öltemperatur die Aufteilung des Wärmeeintrags dieses Motors annähernd ermittelt werden. Da nur ein Gradienten-Kennfeld für diese Arbeit zu der Verfügung steht, wird für jene in der Simulation berücksichtigten, unterschiedlichen Motoren vereinfacht angenommen, dass die Verteilung der Abwärmeströme für alle fahrzeugspezifischen Motoren ähnlich ist und die Aufteilung der Abwärme mit dem Referenzkennfeld ausreichend genau abgebildet werden kann. Wie in der Abbildung 4-24 auf der Seite 109 gezeigt, werden der aktuelle Motorbetriebspunkt, die aktuelle Drehzahl rpm und der aktuelle Mitteldruck p_{me} , und die aktuellen Austrittstemperaturen des Öls $T_{\dot{O}1}$ und jene des Kühlmittels T_{KM} verrechnet, um die Verteilung der Abwärme zu berechnen. Mit den Motorbetriebspunkten werden die jeweiligen Gradienten und der Basiswärmeeintrag ermittelt. Mit den Fluidtemperaturen werden die Temperaturdifferenz $\Delta T_{\dot{O}1}$ bzw. ΔT_{KM} bestimmt. Diese Temperaturdifferenzen werden folgend mit den entsprechenden Gradienten multipliziert und die Summe der Abwärme und dessen Verhältnis in das Motoröl respektive in das Kühlmittel berechnet. Der resultierende Anteil der Kühlmedien wird anschließend mit der betriebspunktabhängigen Abwärme des verbauten Motors multipliziert und in das entsprechende Kühlfluid eingebracht. Mit dem Gesamtbetrag der Abwärme des Referenzmotors wird zudem das Verhältnis zu der Abwärme bei warmen Betriebsbedingungen gebildet. Der ermittelte Wert stellt somit einen Multiplikator dar, um welchen sich die Abwärme in dem Vergleich zu dem Zustand „betriebswarm“ ändert. Der Abwärmekennfeld-Multiplikator wird folglich verwendet, um das Abwärmekennfeld des simulierten Motors an die aktuellen Rahmenbedingungen anzupassen. Mit dem Zusammenhang

$$\dot{m}_{\text{Kraftstoff}} \cdot H_u = P_{\text{Effektiv}} + \dot{Q}_{\text{Abwärme}} + \dot{Q}_{\text{Abgas}} \quad (4-2)$$

wird ersichtlich, dass sich entweder der Massenstrom des Kraftstoffs $\dot{m}_{\text{Kraftstoff}}$, der untere Heizwert des Kraftstoffs H_u oder der Wärmestrom des Abgases \dot{Q}_{Abgas} bei gleichbleibender effektiver Nutzarbeit P_{Effektiv} ändern muss, wenn der Wärmestrom der Abwärme $\dot{Q}_{\text{Abwärme}}$, wie oben beschrieben, variiert. H_u ist kraftstoffspezifisch und deshalb konstant. Für \dot{Q}_{Abgas} wird in der Quelle [181] angenommen, dass der Wärmestrom des Abgases unabhängig von den Temperaturen der Fluidmedien ist. Diese Annahme wird auch hier angewandt, da zu dem einen aus Messungen aus [180] und aus [185] hervorgeht, dass die Abgastemperatur bereits nach wenigen Sekunden eine typische Betriebstemperatur erreicht und zu

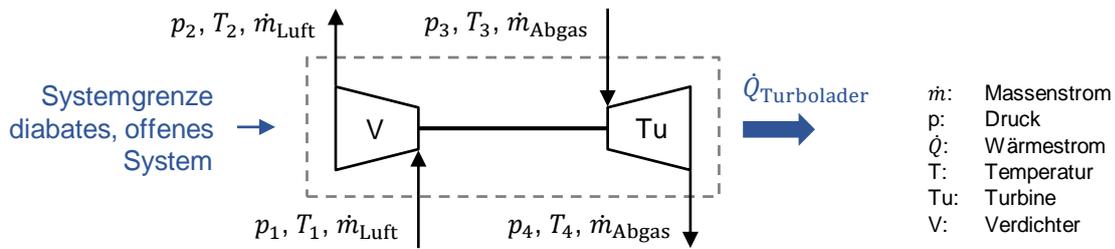


Abbildung 4-25 Schematischer Aufbau des Abgasturboladers nach [170]

Ein Turbolader erhöht die Leistung eines Verbrennungsmotors, indem dieser den effektiven Mitteldruck durch einen Verdichter erhöht. Den für die Komprimierung notwendigen Leistungsbedarf erhält ein Abgasturbolader über eine Turbine, welche diesen dem Massenstrom des Abgases entzieht. Aufgrund der Einbausituation und der Arbeitsweise eines Turboladers ist dieser sehr hohen Temperaturen ausgesetzt. In dem Fall von Ottomotoren kann die Temperatur des Abgases über 1 000 °C und jene bei Dieselmotoren bis zu 850 °C betragen [187]. Aufgrund der hohen thermischen Belastung müssen Turbolader gekühlt werden, um unter diesen Bedingungen einen sicheren Betrieb zu gewährleisten und thermische Schäden aufgrund einer Überhitzung auszuschließen. Die dafür notwendige Kühlung des Turboladers erfolgt dabei über eine reine Ölkühlung, über eine reine Kühlmittelkühlung [188] oder über eine kombinierte Öl-Kühlmittel-Kühlung [189]. In dem Rahmen der durchgeführten Gesamtfahrzeugsimulation wird die letztgenannte Variante der Kühlung berücksichtigt. Der Abgasturbolader wird vereinfacht mit einer thermischen Masse, welche über die Referenzfahrzeugbildung fahrzeugspezifisch bestimmt wird, modelliert. Die Anbindung der Kühlung und die Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten werden methodisch identisch zu der Vorgehensweise bei dem Verbrennungsmotor mit einem glatten, länge durchströmten Rohr angenähert. Diese gewählte Approximation wird durchgeführt, da keine CAD- oder CFD-Daten vorliegen und die Volumina und Oberflächen der Kühlführung aus Schnittdarstellungen ermittelt werden müssen. Bei einer Betrachtung eines Turboladers, analog der Abbildung 4-25, werden Massenströme über die Systemgrenzen transportiert und ein Wärmeeintrag in den Turbolader findet statt. In einem so gewählten Betrachtungsraum eines Turboladers handelt es sich um ein diabates, offenes System [190]. Für die Berechnung des entstehenden Wärmestroms $\dot{Q}_{\text{Turbolader}}$ in die thermische Masse des Turboladers wird der Zusammenhang

$$\dot{Q}_{\text{Turbolader}} = \dot{m}_{\text{Luft}} \cdot (h_1 - h_2) + \dot{m}_{\text{Abgas}} \cdot (h_3 - h_4) \quad (4-3)$$

herangezogen. In diesem werden der Massenstrom der Luft \dot{m}_{Luft} und jener des Abgases \dot{m}_{Abgas} und die spezifischen Enthalpien h_1 , h_2 , h_3 und h_4 , basierend auf dem jeweiligen Betrachtungspunkt der Abbildung 4-25, berücksichtigt. [170]

Aus Messdaten der Datenbank [180] liegen für die eingesetzten Basismotoren die benötigten Kennwerte für die Ermittlung des Wärmeeintrags in die, den Turbolader repräsentierende, thermische Masse vor. Für die Berechnung wird angenommen, dass sich der Massenstrom des Abgases aus dem Massenstrom der Luft und jenem des Kraftstoffs $\dot{m}_{\text{Kraftstoff}}$ analog

$$\dot{m}_{\text{Abgas}} = \dot{m}_{\text{Luft}} + \dot{m}_{\text{Kraftstoff}} \quad (4-4)$$

zusammensetzt. Bei der angewandten Methodik wird die Änderung der potenziellen Energie der Fluidströme vernachlässigt.

Die Temperaturen und Drücke vor, p_1 und T_1 , und nach dem Verdichter, p_2 und T_2 , bzw. vor der Turbine, p_3 und T_3 , und nach der Turbine, p_4 und T_4 , liegen für die Berechnung der Enthalpie vor. In dem Fall der Seite des Verdichters wird die spezifischen Enthalpien der Luft über ein Kennfeld in der Simulationsumgebung GT-SUITE ermittelt. Aufgrund einer Verbrennung kann auf der Seite der Turbine kein Gemisch aus Luft und Kraftstoff angewandt werden. Hierfür wird eine Funktionalität von GT-SUITE genutzt, in

welcher die Produkte einer Verbrennung bei einem Druck von 1 bar, 1 600 K und in dem thermodynamischen Gleichgewicht in Abhängigkeit der Kraftstoff- und der Luftmasse berechnet werden. Die Entstehung von Stickstoffoxiden wird dabei nicht berücksichtigt. Dies wird als vernachlässigbar erachtet, da deren Anteil bei den herangezogenen Motoren über dem gesamten Motorkennfeld in der Größenordnung weniger Promille liegt. Über die so ermittelten Kennwerte wird die Gleichung 4-4 gelöst und der Wärmestrom in den Turbolader berechnet. [170]

Validierung des Verbrennungsmotors

Für die Validierung des Verbrennungsmotors werden sechs, real existierende Fahrzeuge, welche den Motorisierungen der Referenzfahrzeugbildung nahezu entsprechen, nachsimuliert und sowohl die Ergebnisse des Kraftstoffverbrauchs als auch der Verlauf der Temperatur des Kühlmittels und jener des Öls in dem Zertifizierungszyklus mit Messwerten verglichen. Für die Parametrierung der Fahrzeuge und für den Abgleich mit den Messungen wird auf, eine der Fahrzeuganalyse dienenden, Datenbank [180] zurückgegriffen. In dieser sind verschiedene Messprotokolle, welche alle notwendigen Informationen für die Parametrierung und für die Validierung eines Fahrzeugs beinhalten, vorhanden. Unter anderem sind beispielsweise die Ergebnisse der Ausrollkurve für die Ermittlung der Fahrwiderstände, die benötigten Kennfelder für die Parametrierung der Motoren, der gemessene Verbrauch in dem Zertifizierungszyklus NEFZ und der zeitliche Verlauf der Temperaturen der Kühlmedien Kühlmittel und Öl darin zu finden. In dem Rahmen der Validierung des Verbrennungsmotors wird zunächst der Energiebedarf und anschließend das thermische Verhalten anhand der Verläufe der Temperatur des Kühlmittels und des Öls in dem Zertifizierungszyklus NEFZ verglichen.

Die Abbildung 4-26 stellt die gemessenen den simulierten Angaben des Verbrauchs in dem Zertifizierungszyklus NEFZ gegenüber. In dem dargestellten Balkendiagramm ist anzumerken, dass bei den Vergleichsfahrzeugen des Segments 2 und bei jenen des Segments 3 des Benzinfahrzeugs und bei dem Segment 2 des Dieselfahrzeugs sowohl eine Messung bei kalter als auch eine Messung bei warmer Motorstarttemperatur vorliegt. Bei der Betrachtung „Motor kalt“ entsprechen die initialen Temperaturen des Motors und jene des Kühlmediums der Umgebungstemperatur und in dem Szenario „Motor warm“ entsprechen die Temperaturen betriebswarmen Zuständen.

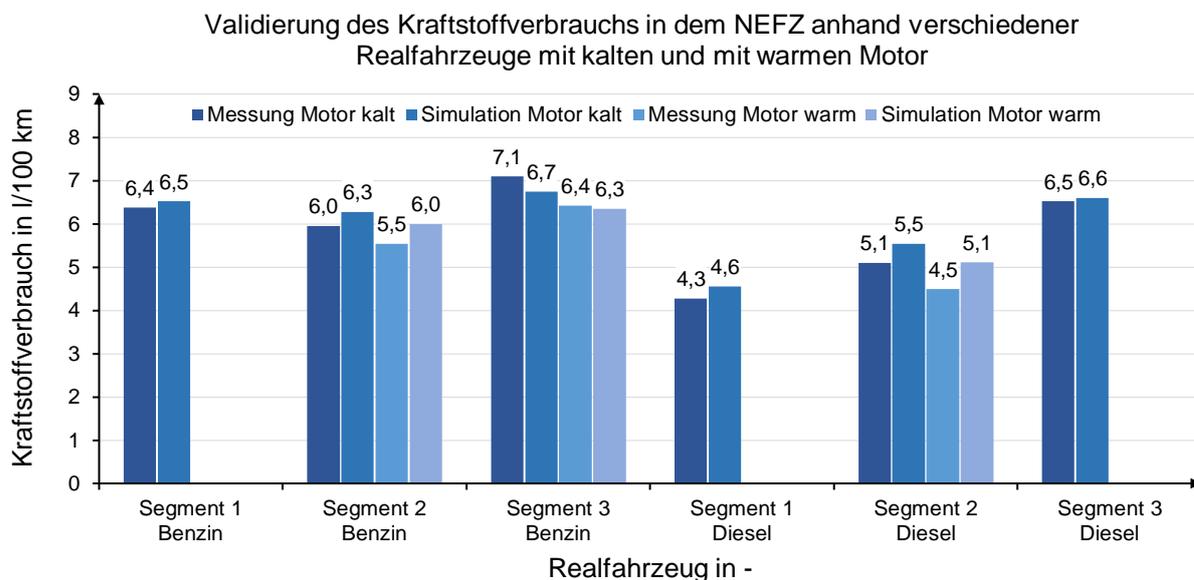


Abbildung 4-26 Validierung des Kraftstoffverbrauchs in dem NEFZ anhand verschiedener Realfahrzeuge der Segmentklassen eins bis drei mit einem Otto- bzw. mit einem Dieselmotor nach [170]

Der Vergleich der simulierten mit den gemessenen Verbrauchswerten bei einem kalten Motor zeigt für alle Fahrzeugvarianten, bis auf jene des Segments 2 Diesel Realfahrzeug, eine gute Übereinstimmung. Der relative Fehler ist immer kleiner als 6,8 % und liegt durchschnittlich bei 4,2 %. Das Dieselfahrzeug

des zweiten Segments zeigt eine leicht erhöhte Abweichung von 8,6 %. Die festgestellten Verbrauchsunterschiede zu der Messung lassen sich in dem Allgemeinen erklären und sind auf verschiedene Einflüsse zurückzuführen. Unter anderem ist die genaue Effizienz des Getriebes, des Differenzialgetriebes und der Lichtmaschine nicht bekannt. Für das Getriebe und das Differenzialgetriebe werden repräsentative Effizienzen der JEC-Studie [6] und für die Lichtmaschine wird jeweils für die Benzin- und für die Diesel-Variante eine Parametrierung aus einer Fachabteilung der Daimler AG verwendet [191]. Folglich sind die situativen Effizienzen der Komponenten leicht unterschiedlich und beeinflussen den Verbrauch. Zudem werden für alle Komponenten des Antriebsstrangs, mit Ausnahme des Motors, einheitliche Massenträgheitsmomente, welche aus Vorlagen in der Simulationssoftware GT-SUITE entnommen sind, verwendet. Hierbei ist anzunehmen, dass sich diese über die Fahrzeuggröße und der damit verbundenen, übertragbaren Leistung bzw. Kraft ändern und von dem ersten zu dem dritten Segment ansteigen. Daraus resultierend würde ein erhöhter Energiebedarf für die Beschleunigung der Massen in dem dritten Segment und eine erniedrigter in dem ersten Segment erfolgen. Des Weiteren hat die vorhergehend beschriebene Ermittlung des Verbrauchsmultiplikators über ein einheitliches Gradienten-Kennfeld und jene des Reibleistungsmultiplikators über die Viskosität des kalten und des warmen Öls einen direkten Einfluss auf den Verbrauch. Abschließend ist zu erwähnen, dass die dargestellten Messwerte einen Mittelwert aus drei Messungen darstellen. Diese weichen in dem Maximalfall um 4,8 % ab. Unter einer Berücksichtigung aller genannter Aspekte ist das erzielte Ergebnis mit einer erreichten Abweichung kleiner als 8,7 %, als ausreichend genau einzustufen.

Neben einem Vergleich der Verbräuche in den Zertifizierungszyklen wird zudem eine Validierung der Temperaturen der Kühlmedien durchgeführt. Dabei wird das Aufwärmverhalten des Kühlmittels und jenes des Motoröls der verschiedenen Fahrzeuge in dem transienten Fall des Zertifizierungszyklus NEFZ betrachtet. Die Abbildung 4-27 auf der Seite 114 stellt die Ergebnisse der Simulation und jene der Messungen für die Benzinfahrzeuge und die Abbildung 4-28 auf der Seite 115 jene für die Dieselfahrzeuge gegenüber. Die Diagramme a) und b) entsprechen dabei jeweils dem ersten, die Diagramme c) und d) jeweils dem zweiten und die Diagramme e) und f) jeweils dem dritten Segment und Referenzfahrzeug.

Bei dem **Benzinfahrzeug** des ersten Segments ist zu erkennen, dass die simulierte Temperatur des Kühlmittels jener der Messung gut folgt. Die, bei dem Vergleich der Verläufe der Temperaturen, auftretende Abweichung ist gering und die Endtemperaturen sind gleich. Die Übereinstimmung der simulierten Temperatur des Öls mit jener der Messung ist in dem Vergleich zu der Betrachtung der Temperatur des Kühlmittels etwas schlechter. Die simulierte Öltemperatur steigt zunächst etwas zu schnell an, trifft anschließend aber die Endtemperatur ausreichend gut. Für das Benzin-Realfahrzeug des zweiten Segments werden zwei unterschiedliche Ausgangsbedingungen, bei -25 °C und bei $+23\text{ °C}$, analysiert. Das Verhalten der Temperatur des Kühlmittels wird, wie bei dem ersten Segment, gut abgebildet, während das Verhalten der Temperatur des Öls leicht zu schnell ansteigt. Die Endtemperaturen werden für beide Kühlmedien gut nachgebildet. Das dritte Segment der Variante Benzinfahrzeug wird ebenfalls bei den beiden genannten Starttemperaturen untersucht. In dem Szenario mit der Ausgangstemperatur $+23\text{ °C}$ ist zu erkennen, dass die simulierte Temperatur des Kühlmittels der gemessenen Temperatur bis ca. 350 s zunächst gut folgt, anschließend einbricht und nachkommend den Messwert erneut ausreichend genau abbildet. Der in diesem Zuge festgestellte Abfall der Kühlmitteltemperatur ist auf eine unterschiedliche Regelung der in dem dritten Segment verbauten, elektrischen Kühlmittelpumpe in der Simulation und in der Messung zurückzuführen. In der Simulation läuft die Kühlmittelpumpe schlagartig an und fördert temporär einen zu hohen Massenstrom. Die festgestellte Abweichung der Temperatur des Kühlmittels ist damit erklärbar. Der simulierte Verlauf der Temperatur des Öls ist in dem Benzinfahrzeug der Oberklasse in dem Vergleich zu dem Temperaturverlauf der Messung anfangs zu hoch und erreicht gegen Ende des Zertifizierungszyklus den Wert der gemessenen Fluidtemperatur. In dem Betrachtungsfall mit einer Starttemperatur von -25 °C ist der simulierte Verlauf der Temperatur des Kühlmittels und jener des Öls stetig niedriger als die jeweils gemessene Größe. Die festgestellte Abweichung kann unter anderem an einer unterschiedlichen Pumpenregelung, der thermischen Anbindung der Ölwanne und jener des Motors an die Umgebung oder an dem, aus dem allgemeinen Gradienten-

ten-Kennfeld ermittelten, Wärmeeintrag liegen. Da das Verhalten der Verläufe synchron, die Ausgangsbedingung -25 °C selten auftritt und der resultierende Wert des Verbrauchs in dem Zertifizierungszyklus gut übereinstimmt, vgl. Abbildung 4-26, wird die Abweichung bei sehr niedrigen Starttemperaturen akzeptiert.

Bei der Analyse des Aufwärmverhaltens der Kühlmedien des **Dieselmotors** ist für das Fahrzeug des ersten Segments ebenfalls zu erkennen, dass die simulierte Temperatur des Kühlmittels und jene des Öls den gemessenen Verlauf der Fluide gut repräsentiert. Über den gesamten Zertifizierungszyklus hinweg sind diese Temperaturen gut abgebildet. Für das Fahrzeug der Mittelklasse mit Dieselmotor ist bei der Betrachtung des Verlaufs des Kühlmittels zu erkennen, dass die simulierte Erwärmung bis ca. 300 s zu schnell stattfindet. Anschließend wird die gemessene Temperatur des Kühlmittels von der simulierten gut repräsentiert. Die anfängliche Erhöhung ist in diesem Fall auf eine schaltbare Kühlmittelpumpe zurückzuführen. Diese wird in der Messung erst nach ca. 300 s aktiv. Somit fließt das Kühlmittel erst ab diesem Zeitpunkt über die Messstelle des Temperatursensors. Der Aufwärmvorgang des Öls wird in der Simulation leicht optimistisch abgebildet. Während das generelle Verhalten gut übereinstimmt, liegt die ermittelte Fluidtemperatur durchgängig etwa 10 K über jener der Messung. Die konstante Abweichung kann unter anderem an einem zu kleinen Ölvolumen, einem zu niedrigen Massenstrom des Öls, einer zu geringen Anbindungsfläche der Ölwanne an die Umgebung und an dem Einsatz eines einheitlichen Gradienten-Kennfelds liegen. Bei dem Vergleich des Verlaufs der Temperatur des Kühlmittels der Simulation mit jenem der Messung der dritten Fahrzeugklasse mit Dieselmotor ist eine erhöhte Differenz erkennbar. Die simulierten Temperaturen sind höher als die gemessenen. Die Abweichung der beiden Temperaturen liegt bis etwa 450 s bei etwa 10 K, wächst anschließend bis auf maximal 25 K an und wird gegen Ende der Messung ausnivelliert. Der Verlauf der Temperatur des Öls wird ebenfalls zu hoch simuliert. Diese hat eine annähernd konstante Abweichung von ca. 10 K zu der Temperatur der Messung. Die festgestellten Differenzen in dem dritten Segment können unter anderem auf einem zu geringen Massenstrom des Kühlmittels und des Öls, auf einer zu geringen Motormasse oder auf einem, durch das Verwenden eines einheitliche Gradienten-Kennfelds, zu hoch berechneten Wärmeeintrag basieren. Da jener aus der Simulation resultierende Verbrauchswert in dem Zertifizierungszyklus jenen der Messung fast exakt ($+0,1\text{ l}/100\text{ km}$) widerspiegelt, wird die Abweichung der Verläufe der Kühlmedien für eine Gesamtfahrzeugsimulation trotz der Abweichung als valide erachtet. [170]

Da aufgrund des Ansatzes eines gesamtheitlichen Simulationsmodells die Rechendauer für eine noch feiner detailliertere Modellierung des Verbrennungsmotors in dem Rahmen dieser Arbeit nicht darstellbar ist und die verglichenen Verbrauchswerte und das berücksichtigte Aufwärmverhalten der Fluide ausreichend genau abgebildet werden, wird das daraus abgeleitete, realitätsnahe Verhalten der Verbrennungsmotoren als hinreichend genau eingestuft. Anzumerken ist dennoch, dass mit einer verfeinerten Modellierung das thermische und energetische Verhalten eines Verbrennungsmotors genauer abbildbar ist.

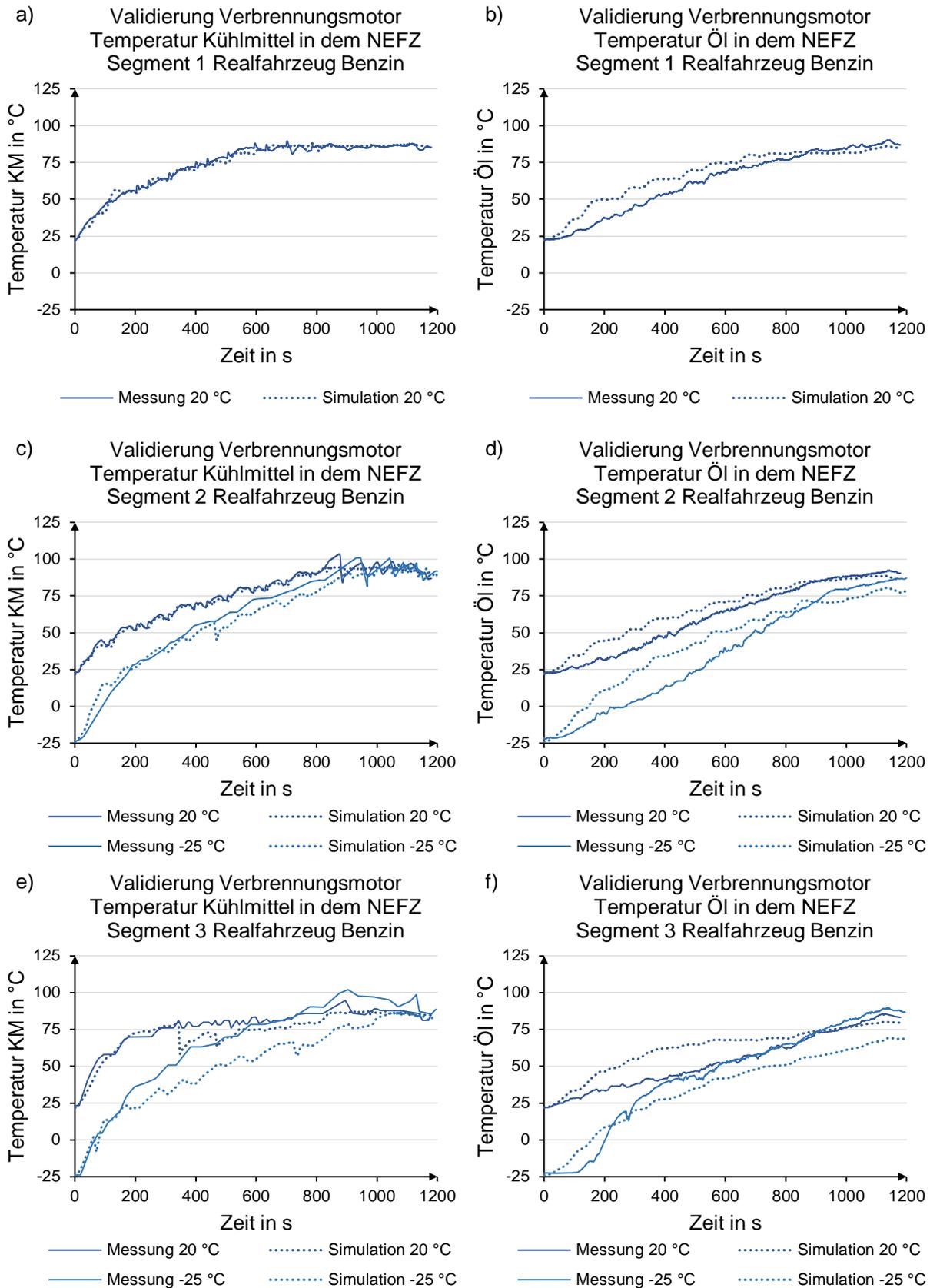


Abbildung 4-27 Validierung des Aufwärmverhaltens des Kühlmittels und des Öls in dem NEFZ bei einem Benzinfahrzeug a) und b) des Segments 1, c) und d) des Segments 2 und e) und f) des Segments 3 nach [170]

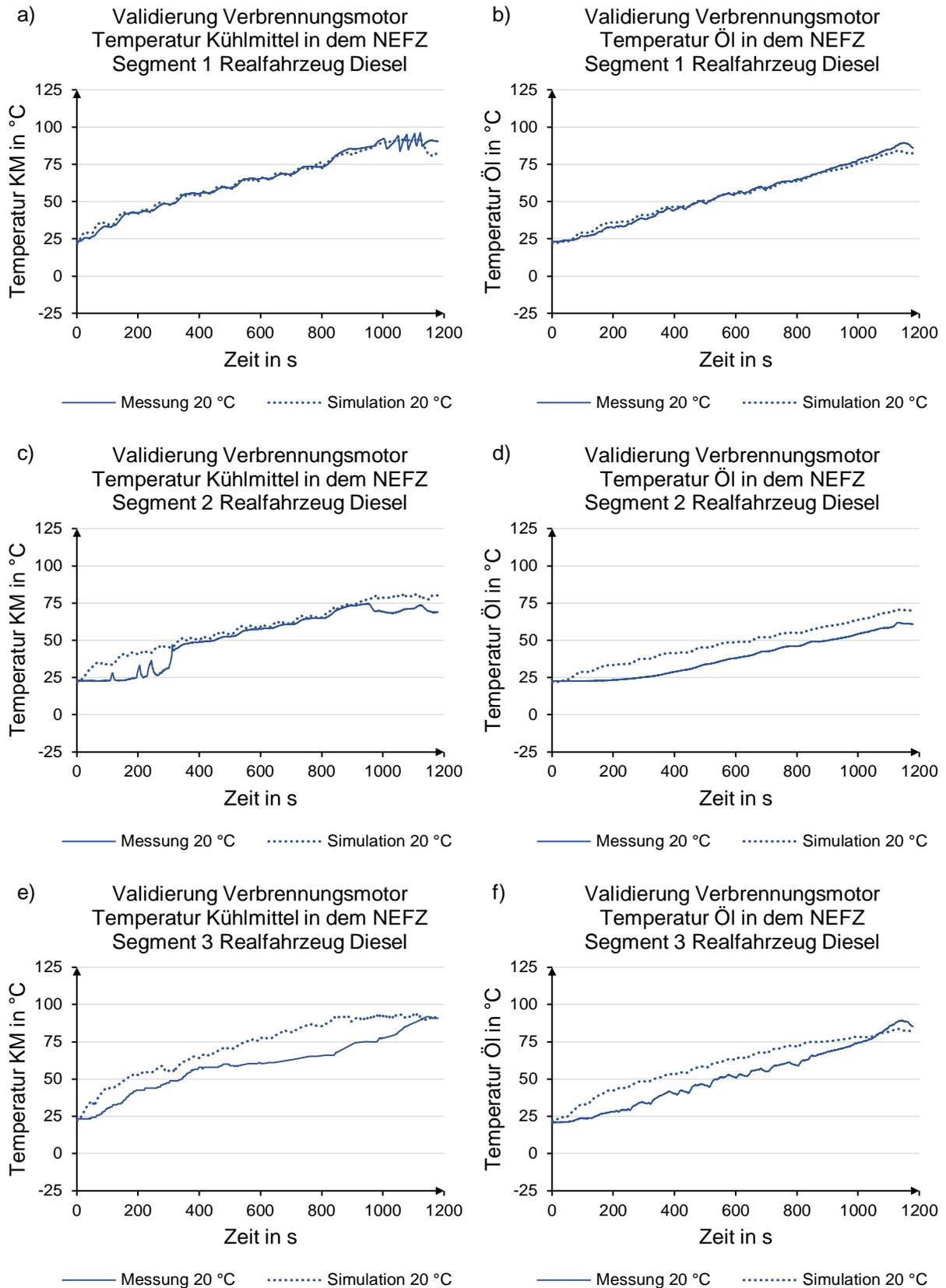


Abbildung 4-28 Validierung des Aufwärmverhaltens des Kühlmittels und des Öls in dem NEFZ bei einem Dieselfahrzeug a) und b) des Segments 1, c) und d) des Segments 2 und e) und f) des Segments 3 nach [170]

4.5 Reifenmodell

In dem folgenden Unterkapitel werden der Aufbau und die Validierung des eingesetzten Reifenmodells erörtert. Zunächst wird der theoretische Einfluss der Reifentemperatur und jener der Fahrgeschwindigkeit auf den Rollwiderstandsbeiwert erläutert. Anschließend wird die Modellierung des verwendeten Reifenmodells beschrieben und diese sowohl anhand sich einstellender, stationärer Reifenschultertemperaturen und Rollwiderstandsfaktoren als auch anhand des sich ergebenden Rollwiderstands des transienten Fahrprofils NEFZ bei unterschiedlichen Starttemperaturen validiert.

Aufbau des Reifenmodells:

In dieser Arbeit wird ein Reifenmodell verwendet, welches sowohl den Einfluss der Temperatur als auch jenen der Rollgeschwindigkeit berücksichtigt. Dies ist notwendig, da der Rollwiderstand, wie in der Abbildung 4-29 a) bis c) erkennbar, unter anderem von der Reifentemperatur, der Fahrstrecke bzw. -zeit (Aufwärmvorgang), der Rollgeschwindigkeit v_R und dem Reifendruck abhängig ist.

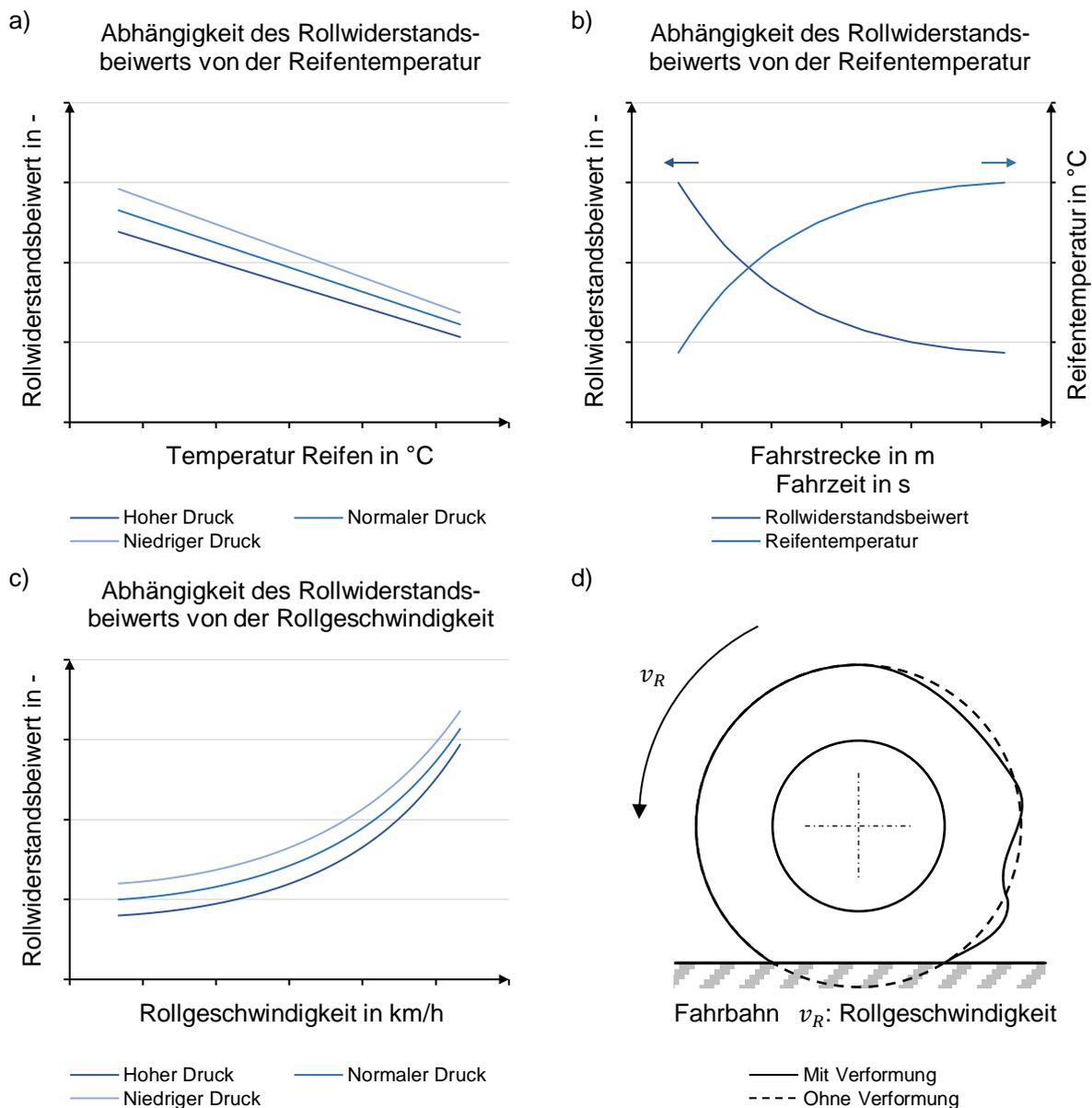


Abbildung 4-29 Abhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwerts von a) der Reifentemperatur, b) der Fahrstrecke bzw. der Fahrzeit und c) der Rollgeschwindigkeit nach [116]; d) Vorformung des Reifens nach [116]

Erhöht sich die Reifentemperatur aufgrund der viskoelastischen Walkarbeit, reduziert sich der Rollwiderstandsbeiwert aufgrund des steigenden Innendrucks (bei einem nicht geregeltem Fülldruck), vgl. Abbildung 4-29 a). Die dabei implizierte Umwandlung von Antriebsenergie in Wärme führt dazu, dass bei einer konstanten Rollgeschwindigkeit der Rollwiderstandsbeiwert aufgrund der Erwärmung des Reifens über der Fahrstrecke bzw. der Fahrzeit abnimmt. Die Abbildung 4-29 b) stellt den beschriebenen Effekt schematisch dar. Wird die Rollgeschwindigkeit erhöht, steigt der Rollwiderstandsbeiwert zunächst moderat und bei hohen Geschwindigkeiten stark an, wie in der Abbildung 4-29 c) qualitativ dargestellt. Die wachsende Zunahme des Rollwiderstandsbeiwerts beruht auf einer zunehmenden Deformationswellenbildung des Reifens und den damit verbundenen Verlustmechanismen. Die Abbildung 4-29 d) visualisiert die Verformung des Reifens schematisch. Die beschriebenen, theoretischen Überlegungen entsprechen unter anderem den Ergebnissen der beiden Untersuchungen von Jansen [192] und Schuring [193]. Jansen untersuchte den Rollwiderstand in einem Temperaturbereich der Umgebungstemperatur von -20 °C bis +40 °C bei einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h und Schuring analysierte den Einfluss der Reifenrollgeschwindigkeit und der Reifenschultertemperatur. Die, in den beiden Publikationen, festgestellten Messergebnisse spiegeln die beschriebene Theorie wider. Schuring [193] schlägt für die Ermittlung des Rollwiderstandsbeiwerts F_{Roll} die Gleichung

$$F_{Roll} = (A_0 + A_1) \cdot e^{(B_0 + B_1 \cdot v_R) \cdot T} \tag{4-5}$$

mit den Konstanten A_0, A_1, B_0, B_1 , der Reifenrollgeschwindigkeit v_R und der Reifenschultertemperatur T vor, um die Effekte mathematisch abzubilden. Mit dem Ziel den Rollwiderstand situativ zu berücksichtigen und diesen damit realitätsnah anzuwenden, muss somit der Einfluss der Rollgeschwindigkeit und jener der Reifentemperatur, wie in der Abbildung 4-30 a) gezeigt, abgebildet werden. Von Watzlaw [194] wurde eine Modellierung des Rollwiderstandsfaktors in Abhängigkeit von der Temperatur der Reifenschulter und von der Rollgeschwindigkeit bereits durchgeführt. In dieser Arbeit wird eine Vereinfachung seines verwendeten Reifenmodells angewandt. Dabei wird, wie in der Abbildung 4-30 b) visualisiert, ein Zwei-Massen- anstatt eines Vier-Massen-Reifenmodells verwendet und die Wärmeübertragung, wie dargestellt, modelliert. Der grundlegende Aufbau und die Verifizierung sind in der betreuten Abschlussarbeit [170] umgesetzt worden. Eine detaillierte Beschreibung des Reifenmodells kann in [170] und in [194] nachgelesen werden.

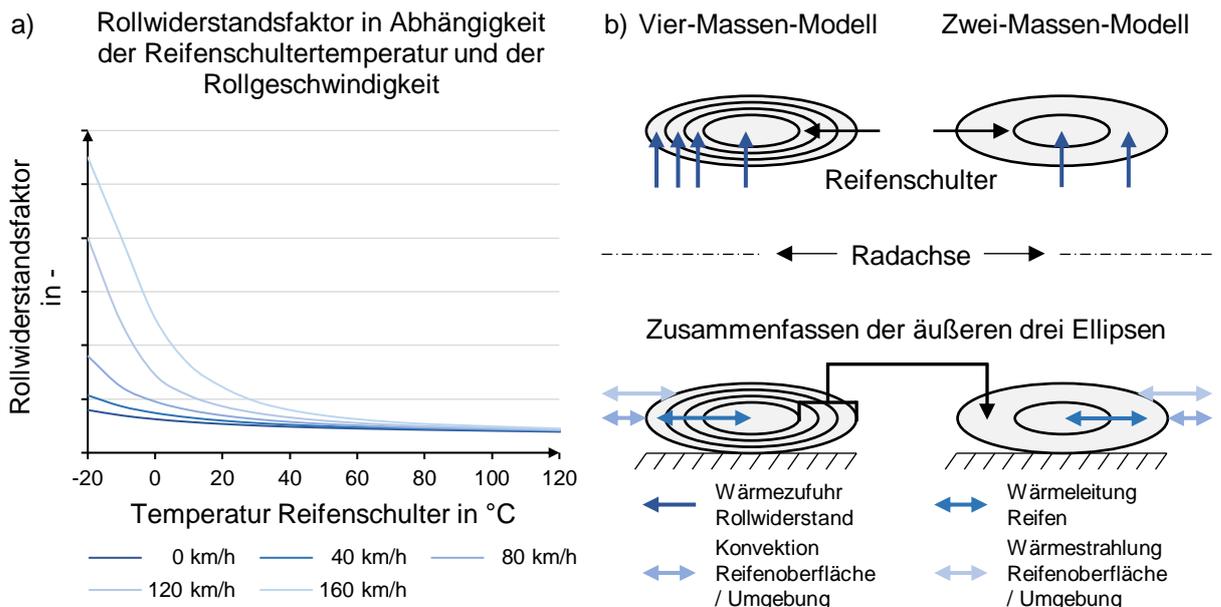


Abbildung 4-30 a) Rollwiderstandsfaktor in Abhängigkeit der Reifenschultertemperatur und der Rollgeschwindigkeit nach [194] und b) schematische Darstellung der Reifenmodelle Vier- und Zwei-Massen-Modell und dessen Wärmeströme nach [170]

Validierung des Reifenmodells:

Mit dem Ziel das Verhalten des Rollwiderstandsbeiwerts zu validieren, werden zunächst die sich einstellende Temperatur der Reifenschulter und der sich einstellende Rollwiderstandsbeiwert analog zu den Rahmenbedingungen der Untersuchung von Jansen [192] bestimmt und mit den in [192] enthaltenen Messwerten verglichen. Dabei werden die beiden Kenngrößen bei einer Umgebungstemperatur von -20 °C , von $+20\text{ °C}$ und von $+40\text{ °C}$, einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h , einer definierten Radlast und einer Prüfzeit von 15 min aufgenommen und verglichen. Die Abbildung 4-31 a) stellt die unter diesen Bedingungen simulierten Temperaturen der Reifenschulter und die resultierenden Rollwiderstandsfaktoren den jeweiligen Messwert gegenüber. Werden die stationären Temperaturen der Reifenschulter verglichen, wird eine maximale Temperaturdifferenz von $7,4\text{ K}$ bei 40 °C Umgebungstemperatur und eine maximale relative Abweichung des Rollwiderstandsfaktors von $4,5\text{ %}$ bei einer Außentemperatur von -20 °C festgestellt. Über die Annahme, dass die Differenz innerhalb der vorhandenen Stützstellen kleiner als das festgestellte Maximum ist, wird für jenen, in dieser Arbeit betrachteten, europäischen Temperaturbereich sichergestellt, dass die Abweichung des Rollwiderstandsbeiwerts immer kleiner als $4,5\text{ %}$ ist.

Neben dem Vergleich einer sich einstellenden Temperatur der Reifenschulter und eines sich einstellenden Rollwiderstandsfaktors bei einer stationären Last wird zusätzlich das transiente Verhalten bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen validiert. Dazu wird das Lastprofil des Zertifizierungszyklus NEFZs anhand eines Fahrzeugs der Marke Mercedes-Benz der Firma Daimler AG simuliert und die Rollwiderstandsleistung mit dem durch mehrere Messungen aus [192] und [195] verifizierten Reifenmodell von Watzlaw [194] verglichen. Wie in der Abbildung 4-31 b) visualisiert, liegen die ermittelten Leistungen für den Rollwiderstand für die Außentemperaturen -20 °C , 0 °C und $+25\text{ °C}$ fast exakt auf jenen, durch Watzlaw [194], verifizierten Werten. Durch die festgestellte, gute Übereinstimmung wird angenommen, dass transiente Effekte ausreichend genau abgebildet werden.

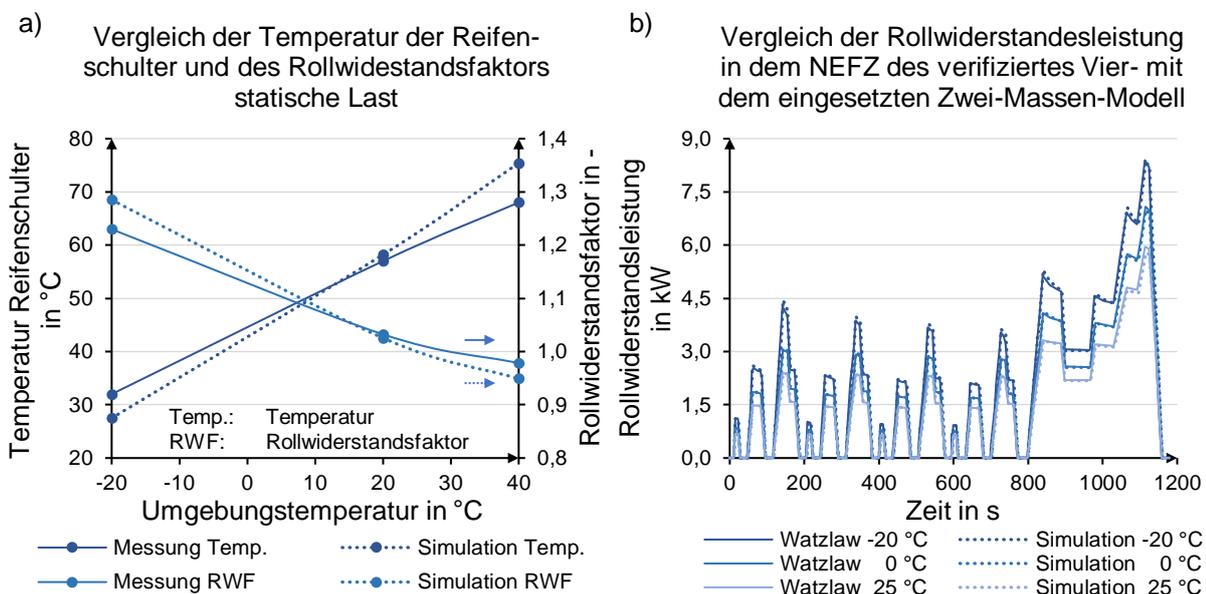


Abbildung 4-31 Validierung des Reifenmodells a) Vergleich der stationären Reifenschultertemperatur und des Rollwiderstandsfaktors nach [170] und b) Vergleich der Rollwiderstandsleistung in dem NEFZ des verifizierten Vier-Massen-Modells mit dem aufgebauten Zwei-Massen-Modell in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur nach [170], [194]

Da sowohl das stationäre als auch das transiente Verhalten hinreichend genau repräsentiert wird, wird das beschriebene Reifenmodell als valide erachtet und in der vorliegenden Arbeit verwendet.

4.6 Fahrgastzellenklimatisierung

Neben den Energiewandlern und neben den Fahrwiderständen werden in dieser Arbeit Nebenverbraucherleistungen in dem Detail untersucht. Diesbezüglich ist es essenziell den Energiebedarf für die Klimatisierung der Fahrgastzelle realitätsnah abzubilden. In dem Folgenden werden deshalb der Aufbau und die Validierung der Klimatisierung der Fahrgastzellen beschrieben. Zunächst erfolgt dabei eine Erläuterung des Aufbaus und des Thermomanagements der Fahrzeugkabine, der, von der Umgebungstemperatur abhängigen, Komforttemperatur und der Steuerung der Umluftrate, welche ebenfalls abhängig von der Außentemperatur ist. Anschließend wird das thermische Verhalten der Kabine anhand eines Aufheiz- und anhand eines Abkühlvorgangs, gefolgt von einer Verifizierung des Energiebedarfs in einem Heiz- und in einem Kühlfall und einer Analyse des Mehraufwands für die Klimatisierung validiert.

Aufbau der Fahrgastzellenklimatisierung

Die in dieser Arbeit betrachtete Kabine wird durch eine eindimensionale Fahrgastzelle abgebildet. Die Abbildung 4-32 a) zeigt den verwendeten Aufbau der Komponenten und die modellierten Wärmeströme schematisch. Die Grundstruktur der Fahrgastzelle, bestehend aus verschiedenen thermischen Ein-Punkt-Massen und den dazugehörigen Wärmeströmen, ist bereits vorgefertigt in der Simulationssoftware GT-SUITE [92] enthalten. Der Aufbau wird lediglich um eine Ermittlung der minimalen Scheibentemperatur, welche für das Detektieren einer Gefahr eines Beschlagens der Scheiben relevant ist, erweitert. Ferner wird die Fahrgastzelle segmentspezifisch parametrisiert. Für die Parametrierung der Fahrgastzelle werden aus drei existierenden Fahrzeugkabinen der Fahrzeugklassen klein, mittel und groß die Materialeigenschaften, Massen und Geometrien ermittelt. Die dabei festgestellten Eigenschaften, wie beispielsweise der Anstellwinkel, die Flächen, die Materialstärken, die Materialarten und die Materialdichten, der Absorptions-, der Emissions- und der Transmissionswerte, sind in dem Anhang 6 dokumentiert. Die Ermittlung und die Parametrierung der physikalischen Kenngrößen wurde in dem Rahmen der betreuten Studienarbeit [98] durchgeführt. Die verwendeten Daten für eine realitätsnahe Parametrierung der Fahrgastzelle entstammen der Quelle [114].

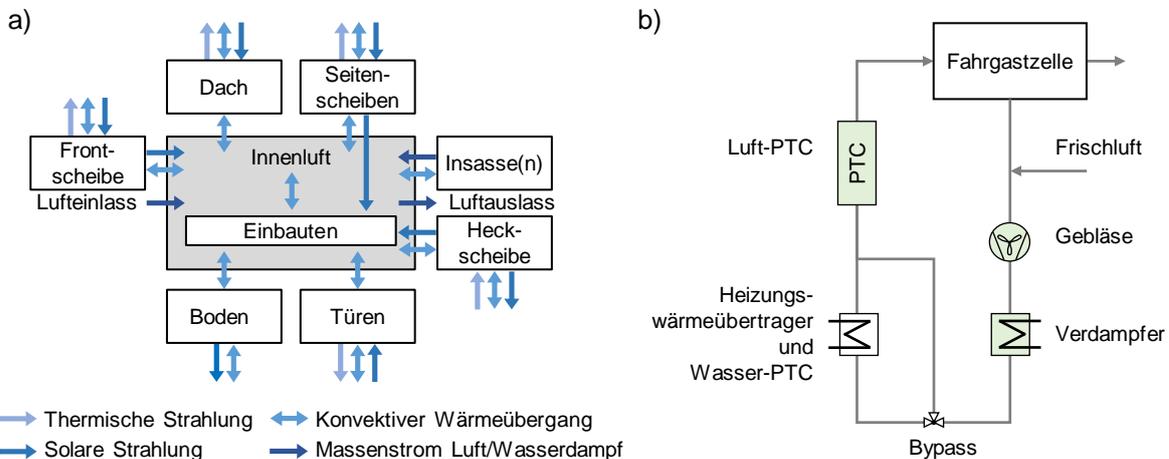


Abbildung 4-32 a) Aufbau der eindimensionalen Fahrgastzelle nach [92] und nach [173] und b) Aufbau des Thermomanagements einer Fahrgastzelle

Modelliert ist die Fahrgastzelle mit den Einbauten, den Scheiben, dem Dach, dem Boden, den Türen, der Kabinenluft als einzelne thermische Massen und einem Insassen, vgl. Abbildung 4-32 a). Die Kabine ist als Ein-Zonen-Modell abgebildet, wodurch das Kabinenluftvolumen als homogen betrachtet wird. Aus der angenommenen Homogenität der Luft resultiert, dass keine Temperaturschichtung, welche in der Realität existiert [196], abgebildet werden kann. Nach [13] und [197] ist ein Ein-Zonen-Modell hinsichtlich des Detaillierungsgrads für eine energetische Analyse jedoch ausreichend und hat gegenüber komplexeren Systemen, Mehr-Zonen-Modelle oder numerische Strömungsberechnungen, den Vorteil einer

merklich kürzeren Rechenzeit. Dieser Benefit ist besonders in dem Kontext einer Gesamtfahrzeugsimulation nicht zu vernachlässigen. Das Luftvolumen der Fahrgastzelle wird durch die Temperatur, durch die relative Feuchtigkeit und durch den vorherrschenden Luftdruck beschrieben. Der Luftstrom in die Kabine bzw. jener aus der Kabine ist mit einem Lufteinlass bzw. mit einem Luftauslass modelliert. Der Massenstrom des Lufteintritts vermischt sich dabei ideal mit der Innenluft der Fahrgastzelle. Der Luftstrom aus der Kabine kann vollständig entweichen oder partiell in dem sog. Umluftbetrieb wiederverwendet werden. Die Umluftrate beschreibt dabei das Verhältnis der Frischluft zu der Umluft. Neben den Enthalpie-Strom der Zu- und der Abluft wird der Wasserdampfeintrag und der Wärmeeintrag des Insassen in Abhängigkeit der Kabinentemperatur gemäß der DIN 1946-3:2006-07 [198] berücksichtigt. Liegt die Temperatur der Fahrgastzelle beispielsweise bei 22 °C, wird eine Wärmeabgabe von 90 W und eine Wasserdampfabgabe von 40 g/h simuliert. Die abgebildeten Massen der Fahrgastzelle, der Insasse und die Umgebung beeinflussen sich durch einen konvektiven Wärmeübergang gegenseitig. Die dabei verwendeten Wärmeübergänge sind analog zu der FAT⁴²-Studie [173] für außen liegende Wärmeübergänge in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und für innen liegende Wärmeübergänge in Abhängigkeit des Volumenstroms der Belüftung angewandt. Dabei ist der Wärmeübergangskoeffizient innen mindestens 7 W/m²*K und außen mindestens 25 W/m²*K. Für den inneren Wärmeübergangskoeffizienten des Dachs, der Türen, der Luft und des Bodens wird der Mindestwert unabhängig des Belüftungsvolumenstroms gewählt, da die Strömungsgeschwindigkeit deutlich reduziert ist und der Wärmeübergangskoeffizient erst bei erhöhten Volumenströmen spürbar steigt. Durch die thermische Strahlung stehen die außen liegenden Bauteile in dem Austausch zu der Umgebung. Hier wird näherungsweise die Umgebungstemperatur zu der Berechnung der thermischen Strahlung nach der Gleichung 2-22 auf der Seite 41 verwendet. Die solare Strahlung trifft auf alle außen liegenden Komponenten ausschließlich des Bodens, welcher nicht direkt angestrahlt wird. Die Wärmeleistung wird teilweise absorbiert und durch die Scheiben transmittiert. Die Lichttransmission, der Anteil der Strahlung, welcher die Scheiben durchdringt, trifft auf die Einbauten und erwärmt diese. Die segmentspezifisch ermittelten Flächen und Anstellwinkel werden für die Berechnung der eintreffenden Strahlung berücksichtigt.

Wie in der Abbildung 4-32 b) gezeigt, ist die beschriebene Fahrgastzelle in einen Kreislauf für die Klimatisierung eingebunden. Dieser besteht aus einer Frischluftsteuerung, einer Gebläse-, einer Verdampfer-, einer Bypass- und einer Wasser- oder einer Luft-PTC-Regelung. In dem Kapitel 5.1.1 werden das komplexe Zusammenspiel der Klimatisierung und dessen Zielgrößen detailliert beschrieben.

Validierung der Fahrgastzellenklimatisierung

Mit dem Ziel das thermische Verhalten und den Energiebedarf der beschriebenen Klimatisierung der Fahrgastzelle zu validieren, wird der Verlauf der Temperatur der Kabine bei dem Aufheizen und bei dem Abkühlen, die Wärmeübertragung bei dem Heizen durch einen Wasser-PTC, die Ermittlung des Energiebedarfs bei dem Kühlen durch eine COP-Berechnung und der Energiebedarf des Zusammenspiels der Klimatisierung folgend validiert.

Für die Validierung des Aufheiz- und des Abkühlverhaltens wird die Kabine separat betrachtet. Dazu wird der Temperaturverlauf einer Fahrgastzelle der Mittel- und der Oberklasse nach einer normierten Aufheiz- und Abkühlmessung simuliert und mit Daten einer Fachabteilung der Firma Daimler AG verglichen [199]. Die Aufnahme der Daten erfolgt dabei nach der Richtlinie DIN 1946-3:2006-07 [198] und der VDA⁴³-Empfehlung 220 [200]. Die Einblastemperatur der Messungen wird bei der Simulation analog zu der Messung angewandt und das Verhalten der Kabinentemperatur verglichen. Wie in der Abbildung 4-33 a) und der Abbildung 4-33 b) dargestellt, weichen die simulierten Verläufe der Temperatur der Fahrgastzelle für beide Kabinengrößen nur marginal ab. Speziell das simulierte Verhalten der Mittelklasse ist nahezu identisch zu der Messung, siehe Abbildung 4-33 a). Nach ca. 30 s beträgt die maximale Differenz lediglich 2,2 K. Bei dem Vergleich der Verläufe der Temperatur der Fahrgastzelle der

⁴² FAT ist ein Akronym und steht für Forschungsvereinigung Automobiltechnik.

⁴³ VDA ist ein Akronym und steht für Verband der Automobilindustrie E.V..

Oberklasse sind geringfügige Abweichungen erkennbar. Besonders bei dem Aufheizen zeigen sich ein leicht verzögertes Verhalten und eine etwas niedrigere Endtemperatur mit einem Temperaturunterschied von 1,9 K. Bei dem Abkühlverhalten kühlt die simulierte Fahrgastzelle anfangs etwas schneller ab und konvergiert gegen einen leicht erhöhten Endwert, welcher in dem direkten Vergleich um 2,4 K wärmer ist. Insgesamt repräsentieren die simulierten Temperaturverläufe der beiden Fahrgastzellengrößen das Aufheiz- und das Abkühlverhalten gut. Folglich wird dieses als valide bezeichnet. Das Verhalten der Kabinengröße des Fahrzeugsegments klein konnte aufgrund fehlender Daten nicht validiert werden. Basierend auf den Resultaten der beiden größeren Kabinen wird angenommen, dass das Abkühl- und das Aufheizverhalten der Fahrgastzelle klein ebenfalls realitätsnah abgebildet wird.

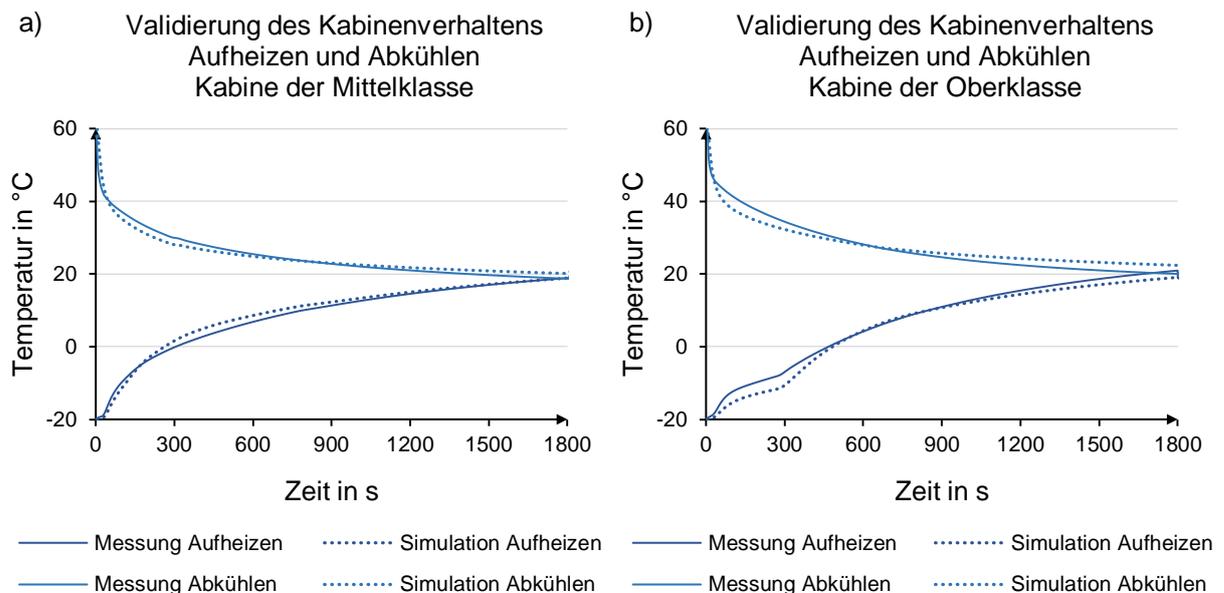


Abbildung 4-33 Validierung des Kabinenverhaltens bei dem Aufheizen und bei dem Abkühlen anhand einer Kabine der a) Mittelklasse und der b) Oberklasse nach [98]

Neben dem Verhalten der Temperatur der Kabine wird für den Heizfall die Wärmeübertragung durch einen Wasser-PTC und für den Kühlfall die Leistungsaufnahme des elektrischen Kompressors durch einen Vergleich des COPs validiert. In dem Rahmen der Validierung des elektrischen Heizers wird eine Messung aus [201] nachsimuliert und der Verlauf der Temperatur des Kühlmittels und jener der Eintrittstemperatur der Kabinen verglichen. Dabei wird ein HV-PTC als eine thermische Masse mit einem Gewicht von 2,4 kg abgebildet [201]. Wie in der Abbildung 4-34 a) dargestellt, ist das anfängliche Verhalten der Temperaturen der Messung und jener der Simulation identisch. Ab ca. 600 s erreichen die beiden Temperaturverläufe bereits stationäre Werte. Dabei ist die simulierte Temperatur des Kühlmittels in dem Vergleich zu jener der Messung um etwa 4 K erhöht, während die simulierte Eintrittstemperatur in die Kabine annähernd der Messung entspricht. Die festgestellte, geringfügige Abweichung der Temperatur des Kühlmittels wird aufgrund eines niedrigen Einflusses auf den gesamtheitlichen Energiebedarf als akzeptabel eingestuft. Sowohl das Verhalten des elektrischen Heizers als auch der Wärmeübergang des Heizungswärmeübertragers werden, basierend auf den Ergebnissen, als valide erachtet.

Für eine Bewertung des Energiebedarfs des Kühlfalls ist die elektrische Leistungsaufnahme des Klimakompressors relevant. Wie in dem Kapitel 2.6.3 beschrieben, lässt sich diese theoretisch über den COP bzw. den EER berechnen. Da eine detaillierte Simulation des Kältemittelkreislaufs in dem Rahmen einer Gesamtfahrzeugsimulation aus Gründen der Rechenzeit nicht realisierbar ist, wird in dieser Arbeit der theoretisch mögliche COP bzw. EER mit einem Gütegrad verrechnet, um die praktisch erreichbaren Leistungsverhältnisse zu ermitteln. Bei diesem Vorgehen ist darauf hinzuweisen, dass dies eine Approximation darstellt. Das verwendete Verfahren wird anhand der ermittelten COP-Werte aus der FAT-Studie [173] plausibilisiert, um die Güte der angewandten Methodik festzustellen.

Wie in der Abbildung 4-34 b) dargestellt, stimmen die berechneten und die realen COPs in dem Temperaturbereich der Außenluft von 15 °C bis 35 °C gut überein. Unterhalb von 15 °C lässt sich eine erhöhte Abweichung feststellen. Bei 10 °C liegt der berechnete COP unterhalb des realen Werts und weicht um 18,0 % ab. Da bei einer Klimatisierung einer Fahrgastzelle in den meisten Fällen eine Temperatur größer als 15 °C vorliegt, wird diese Abweichung als akzeptabel eingestuft. In dem relevanten Temperaturbereich liegt eine maximale Differenz von lediglich 7,8 % vor. Auf diesem Ergebnis basierend, wird die COP-Berechnung als valide eingestuft.

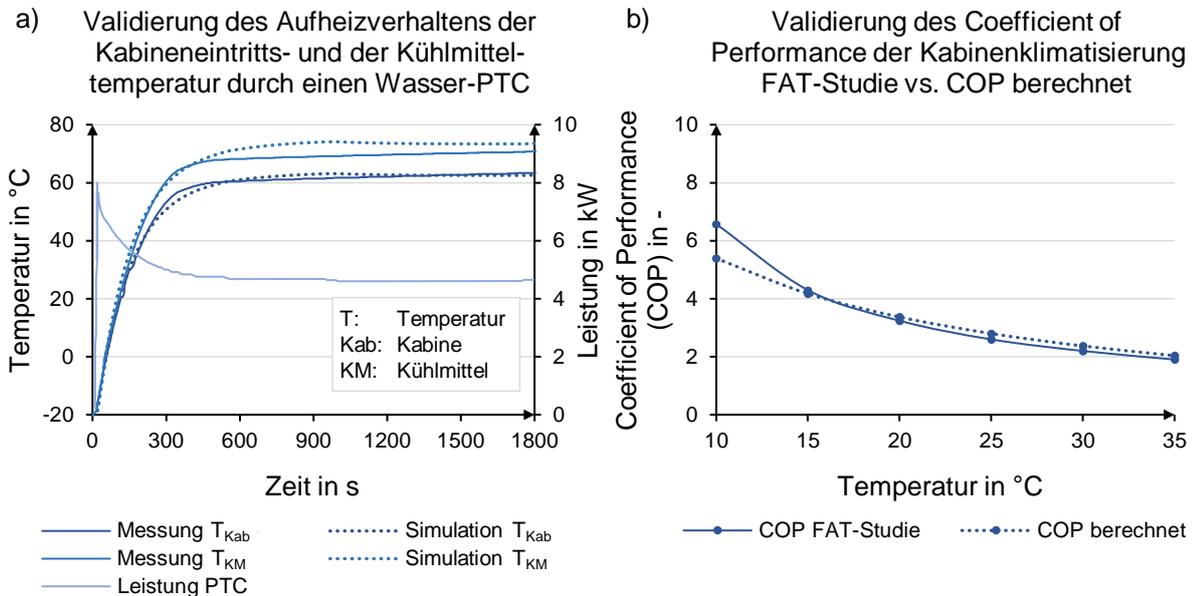


Abbildung 4-34 a) Validierung des Aufheizverhaltens der Kabineneintritts- und der Kühlmitteltemperatur durch einen Wasser-PTC nach [201] und b) Validierung des berechneten COPs für die Kabinenklimatisierung nach [112], [173]

Nachdem gezeigt wurde, dass das Verhalten der Kabine bei einem Aufwärm- und bei einem Abkühlvorgang, das Heizverhalten mittels Wasser-PTCs und die Leistungsberechnung des Verdampfers realitätsnah repräsentiert werden, wird folgend eine Validierung des Zusammenspiels derer bzw. eine Validierung des Energiebedarfs der Klimatisierung bei unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlichen Lastprofilen durchgeführt. Diesbezüglich werden Messungen der Fahrzeuge Smart electric drive und Mercedes-Benz A-Klasse EV von der Firma Daimler AG einer Studie [202] und dessen Anhang [203] des ÖVKs⁴⁴ nachsimuliert. Dabei werden die Lastprofile Innerorts, Außerorts und Autobahn bei Temperaturen zwischen -20 °C und +30 °C in 10-Kelvin-Schritten herangezogen. Das Testszenario Innerorts ist 1 771 s, das Testszenario Außerorts 873 s und das Testszenario Autobahn 373 s lang. Die sich aus der Simulation ergebenden, zusätzlichen Energieaufwendungen für die Klimatisierung der Fahrgastzelle sind in der Abbildung 4-35 a) für das Fahrzeug Smart electric drive und in der Abbildung 4-35 b) für das Fahrzeug Mercedes-Benz A-Klasse EV den jeweiligen Messwerten gegenübergestellt. Besonders bei einem Vergleich des zusätzlichen Energiebedarfs für die Klimatisierung anhand der Mercedes-Benz A-Klasse E-CELL ist eine sehr gute Übereinstimmung des Aufwands für die Temperierung der Fahrgastzelle erkennbar. Bei der Betrachtung des Smart electric drive ist dies überwiegend auch zutreffend. Lediglich bei +30 °C und bei -20 °C in dem Testszenario Innerorts und bei kalten Temperaturen auf der Autobahn ist eine merkliche Abweichung sichtbar. Besonders bei einem Vergleich des Energiebedarfs bei +30 °C Innerorts zwischen der Messung des Smart electric drive und jener der Mercedes-Benz A-Klasse E-CELL fällt ein unerwarteter Unterschied auf. Ausgehend von einer kleineren Fahrgastzelle und somit geringeren thermischen Massen der Komponenten der Fahrgastzelle wird erwartet, dass der Kühlbedarf bei gleichen Ausgangs- und bei gleichen Prozessbedingungen niedriger ausfällt. Dies ist für

⁴⁴ ÖVK ist ein Akronym und steht für Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik.

die ebenfalls in der Quelle [202] vermessenen Fahrzeugvarianten Mitsubishi i-MiEV der Firma Mitsubishi Motors Corporation und Nissan Leaf der Firma Nissan Motor Company auch zutreffend, jedoch für den Smart electric drive nicht der Fall. Die festgestellte Unregelmäßigkeit könnte auf einem unterschiedlichen Kältemittelkreislauf mit einem geringeren COP, auf einer zusätzlichen Berücksichtigung des Kühlbedarfs der Batterie oder auf einer abweichenden Ausgangsbedingung, wie beispielsweise einer initial erhöhten Starttemperatur der Massen der Kabine, beruhen. Da in der durchgeführten Simulation ein durchgängig identischer Gütegrad verwendet und die Klimatisierung der Fahrgastzelle einheitlich und ohne Einfluss einer Batteriekühlung analysiert wird, fällt der Energiebedarf für die Kühlung des Fahrzeugs Smart electric drive erwartungsgemäß niedriger aus. Bei dem Vergleich in dem Autobahnzyklus und der dabei festgestellten Abweichung kann als eine mögliche Ursache die kurze Testzeit von nur etwas über 300 s und der somit hohe Einfluss der Initialbedingungen genannt werden. Hier könnte eine anfangs zunächst höhere PTC-Leistung als jene in der Simulation angenommene geflossen sein. Da der Energieverbrauch bei dem Heizen für die Zyklen Außerorts und Innerorts gut abgebildet wird, wird das gesamte Ergebnis dennoch als hinreichend genau eingestuft.

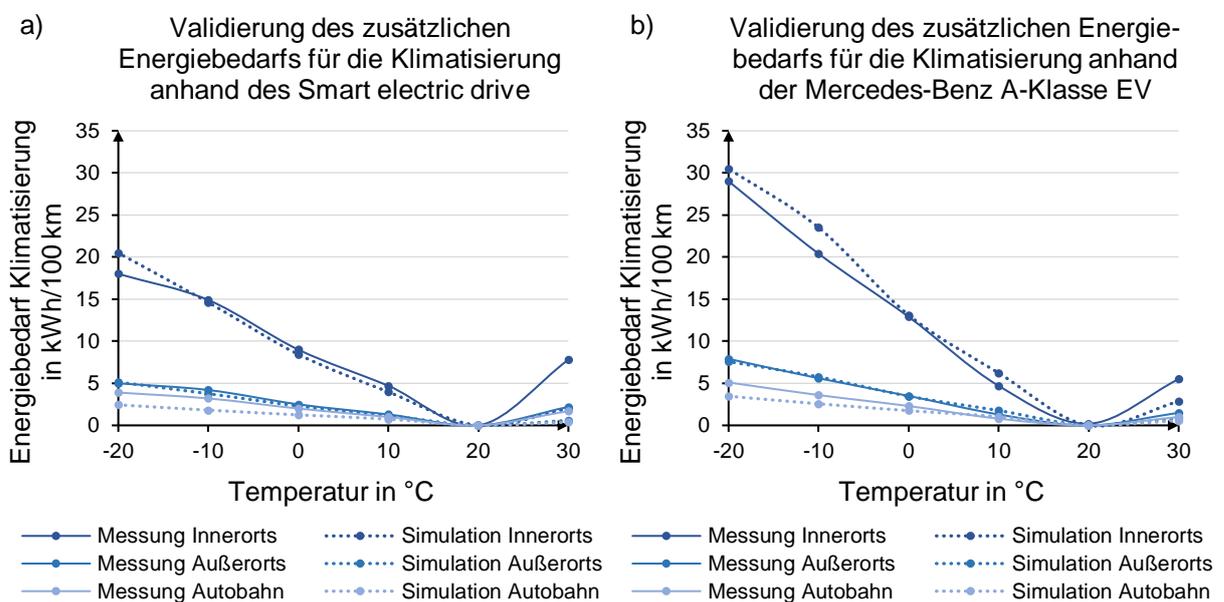


Abbildung 4-35 Validierung des zusätzlichen Energiebedarfs für die Klimatisierung anhand a) des Smart electric drive und anhand b) der Mercedes-Benz A-Klasse EV nach [98], Messwerte aus [202], [203]

4.7 Energiebedarf ohne Nebenverbraucher

In dem Folgenden wird der Energieverbrauch unterschiedlicher Antriebsvarianten untersucht, wobei der Einfluss von nicht für das Absolvieren des Zyklus relevanten Nebenverbrauchern ausgeschlossen wird. Die Eigenschaften der Simulationsmodelle orientieren sich dabei an dem Tank-to-Wheels-Bericht [6] der JEC. Der Energieverbrauch in dem NEFZ des Berichts [6] umfasst die beiden Jahre 2010 und 2020. Die Abbildung 4-36 stellt einen Vergleich des Energieverbrauchs dar, wobei die Werte des Tank-to-Wheels-Berichts [6] dunkelblau und die simulierten Werte dieser Arbeit hellblau gekennzeichnet sind. In dem Balkendiagramm ist zu erkennen, dass die alternativen Antriebe, d. h. BEV, FCEV und FC-REEV, gut übereinstimmen. Der relative Fehler beträgt hierbei maximal 3,3 %. Geringfügig erhöhte Abweichungen sind hingegen in den konventionellen Varianten ICE-G- und ICE-D-Fahrzeug zu sehen, was auf eine ungleiche Gaspedalregelung und auf unterschiedlich detaillierte Kennfelder der Verbrennungsmotoren zurückzuführen ist. Bei der Betrachtung der konventionellen Antriebsvarianten beträgt die relative Abweichung 5,0 %. Das Simulationsmodell weist somit auch hier eine geringe Abweichung in dem Fahrzeugverbrauch auf. Deshalb wird dieses als valide bezeichnet.

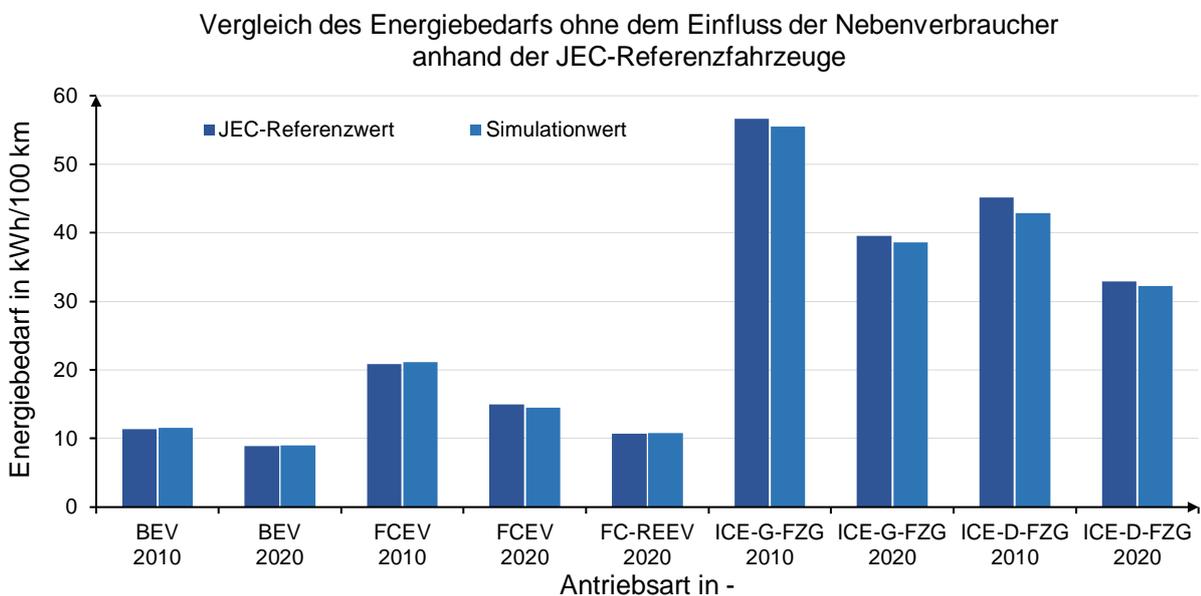


Abbildung 4-36 Vergleich des Energieverbrauchs ohne den Einfluss der Nebenverbraucher anhand der JEC-Referenzfahrzeuge [6]

Durch den Vergleich der unterschiedlichen Antriebsvarianten in dem Zertifizierungszyklus NEFZ und durch die daraus ermittelte, geringe Abweichung des Energiebedarfs, werden die ersten beiden Submodelle, „Fahrzeugarchitektur“ und „Antriebsstrang elektrisch und mechanisch“, als valide angesehen. Der Einfluss der Nebenverbraucher ist dabei jedoch unberücksichtigt. In dem folgenden Unterpunkt wird deshalb der gesamtheitliche Energieverbrauch validiert. Dazu werden die beiden Fahrzeugvarianten batterieelektrisches Fahrzeug und Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor herangezogen und anhand der Realfahrzeuge Mercedes-Benz A-Klasse E-CELL der Firma Daimler AG und dem VW Polo Blue Motion Diesel der Firma Volkswagen AG validiert.

4.8 Energiebedarf mit Nebenverbraucher

Für eine Überprüfung des gesamtheitlichen Energieverbrauchs werden die Untersuchungen und die Angaben der Studie [202] des ÖVKs für ein batterieelektrisches Fahrzeug und für ein Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor nachgebildet, simuliert und die Verbrauchswerte der Simulation mit jener der Messung verglichen. Aus einer Datenbank [38] der Firma Daimler AG werden die Fahrzeugeigenschaften ermittelt und die Komponenteneigenschaften über die bereits beschriebenen Methoden skaliert. In der herangezogenen Studie des ÖVKs wird der Energieverbrauch verschiedener Fahrzeuge auf einem Rollenprüfstand, bei einem festgelegten Lastprofil und bei definierten Temperaturen, -20 °C bis $+30\text{ °C}$ in 10-Kelvin-Schritten, gemessen.

Wie in der Abbildung 4-37 zu erkennen, werden für beide Fahrzeugvarianten für die untersuchten Temperaturen annähernd die Verbrauchswerte der Messung simuliert. In dem Mittel wird eine Abweichung kleiner als 3,4 % erreicht. Die geringen Abweichungen können unter anderem aufgrund der abgeleiteten Komponenteneigenschaften und einer unbekanntenen Betriebsstrategie der Fahrzeuge begründet werden. Da die maximale Differenz des Energiebedarfs unterhalb von 8,2 % liegt, wird die gesamtheitliche Berechnung des Verbrauchs für die beiden Antriebsformen BEV und ICE-D-Fahrzeug als realitätsnah betrachtet.

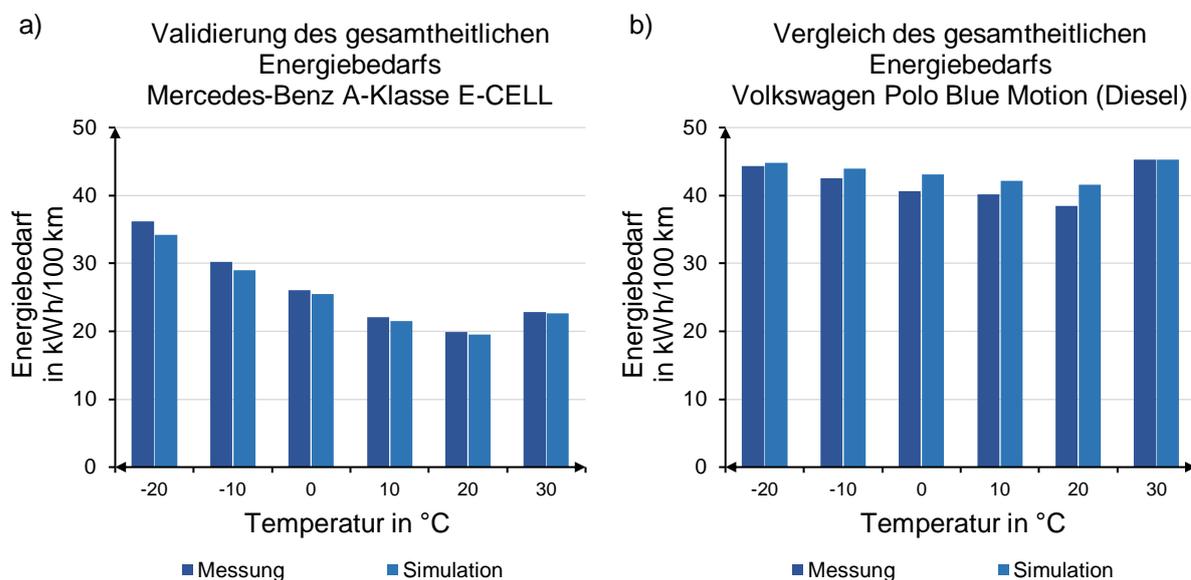


Abbildung 4-37 Vergleich des gesamtheitlichen Energieverbrauchs für die Fahrzeuge a) Mercedes-Benz A-Klasse E-CELL der Firma Daimler AG und b) Volkswagen Polo Blue Motion Diesel der Firma Volkswagen AG nach [204], Messwerte aus den ÖVK-Studien [202], [203]

Aufgrund fehlender Informationen zu den Antriebsvarianten mit einem Brennstoffzellensystemen und jenen mit einem Ottomotor wird der gesamtheitliche Energieverbrauch dieser Antriebsstrangkonfigurationen nicht anhand realer Fahrzeuge validiert. Da sowohl die einzelnen Komponenten als auch der Energieverbrauch in dem Fahrbetrieb ohne Nebenverbraucher mit guten Ergebnissen validiert wurde, wird angenommen, dass diese beiden Antriebsformen ebenfalls hinreichend genau modelliert werden.

Mittels des in diesem Kapitel beschriebenen Aufbaus und der durchgeführten Validierung auf Komponenten-, auf Modul- und auf Gesamtebene wird der gesamtheitliche Energiebedarf der verschiedenen Antriebsvarianten und der verschiedenen Fahrzeuggrößen realitätsnah abgebildet. Die Antriebsstränge BEV, FCEV, FC-PHEV, FC-REEV und ICE-G- und ICE-D-Fahrzeug werden folgend simulativ aufgebaut, um anschließend eine Energiebetrachtung, nach der in dem 3. Kapitel beschriebenen Methodik, durchzuführen.

5 Aufbau und Beschreibung der Antriebsvarianten

In diesem Kapitel werden alle Gesamtfahrzeugmodelle der untersuchten Antriebsvarianten dargestellt und erklärt. Die Reihenfolge der Beschreibung erfolgt dabei wie folgt. Zunächst wird ein reines Batterie-fahrzeug, gefolgt von einem Brennstoffzellen-Range-Extender-, einem Brennstoffzellen-Plug-In- und einem reinen Brennstoffzellenantrieb erläutert. Anschließend werden Aufbauten mit einem Verbrennungsmotor diskutiert. Dabei werden die Basisvarianten mit einem Otto- oder mit einem Dieselmotor betrachtet. Für jede Antriebsvariante wird zunächst ein schematischer Aufbau der Untermodule „Fahrzeugarchitektur“, „Antriebsstrang mechanisch und elektrisch“, „Antriebsstrang thermisch“ und „Fahrgastzelle thermisch“ skizziert. Anschließend erfolgt in jener Reihenfolge eine detaillierte Erörterung der Antriebsvariante. Aufgrund eines modularen Aufbaus des Gesamtfahrzeugs wird auf wiederkehrende Module anfangs eingegangen und darauffolgend auf die initiale Beschreibung verwiesen.

Sowohl für die alternativen Antriebe als auch für die Varianten mit einem Benzin- und mit einem Dieselmotor wird ein komplett modulares Simulationsmodell aufgebaut. Diese erlauben vollvariabel einen der Antriebe, eine Segmentgröße, ein Lastprofil, ein Betrachtungsjahr und ein Betrachtungsland zu simulieren. Die Parametrierung erfolgt dabei durch eine übergeordnete Excel-Tabelle, welche unter anderem über das Auslegungstool bedatet wird. Als Modellbezeichnungen werden „xEV-2015“, „xEV-2025“ und „ICE-2015“ gewählt. Folgend wird jede Antriebsvariante skizziert und diskutiert.

5.1 Batteriefahrzeuge

Das BEV, wie auch das FCEV, wird sowohl für das Betrachtungsjahr 2015 als auch für das Prognosejahr 2025 analysiert. Folgend wird der Fahrzeugaufbau für die Variante 2015 und anschließend jener für die Variante 2025 erläutert. Beide Modelle werden anhand der genannten Submodellstruktur erklärt.

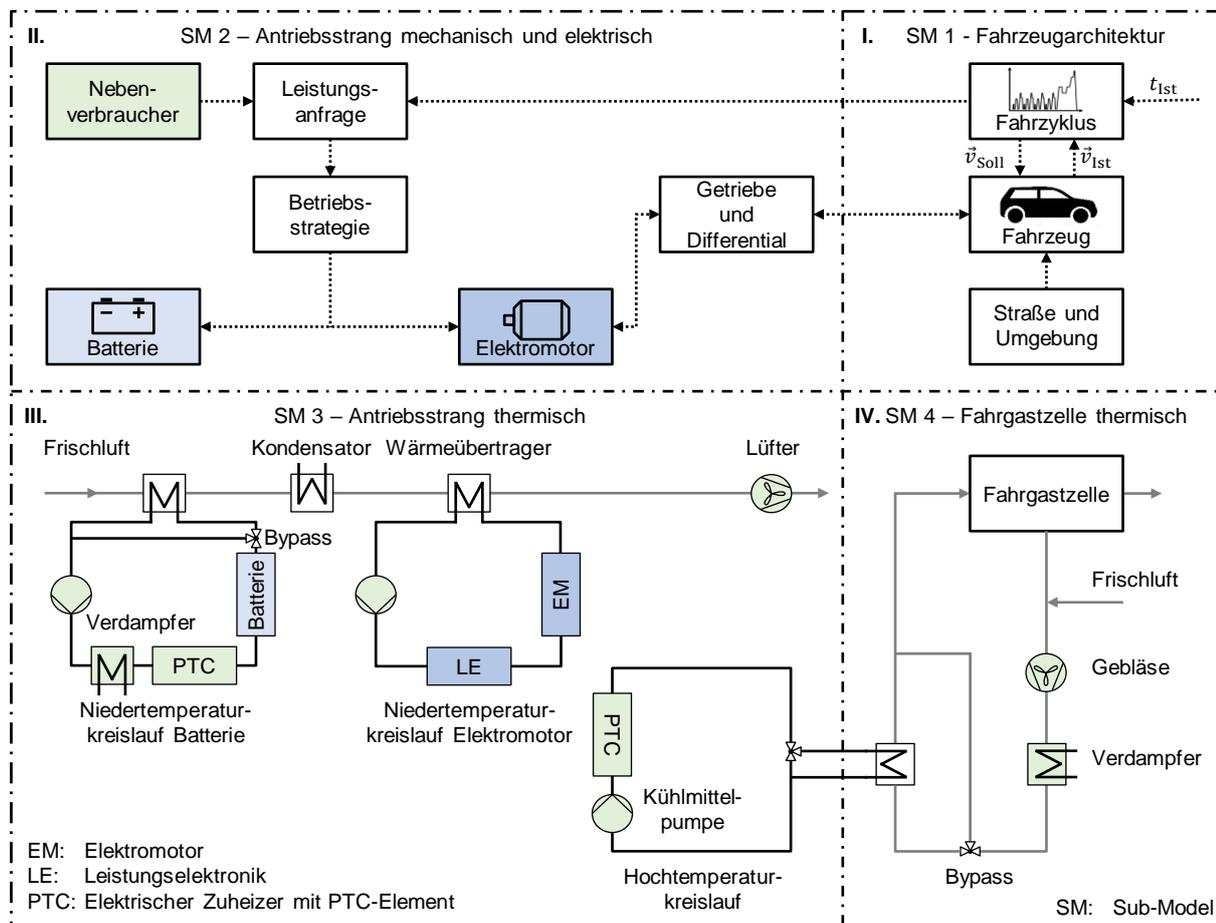


Abbildung 5-1 Schematischer Aufbau der Antriebsstrangvariante Batterie-fahrzeug 2015 nach [115]

5.1.1 Batteriefahrzeug 2015

In der Abbildung 5-1 ist der Aufbau des Batteriefahrzeugs für das Betrachtungsjahr 2015 gezeigt. Dieser wird folgend durch die vier Submodelle „Fahrzeugarchitektur“, „Antriebsstrang mechanisch und elektrisch“, „Antriebsstrang thermisch“ und „Fahrgastzelle thermisch“ beschrieben.

Submodell 1 – Fahrzeugarchitektur:

Die Fahrzeugarchitektur der untersuchten Antriebsvarianten ist in der Simulationsumgebung generell identisch aufgebaut. Wie die Abbildung 5-2 dargestellt, besteht diese aus dem Differentialgetriebe, den Achsen, den Reifen, dem Rollwiderstandsmodell, der Umgebung, dem Fahrzeug, der Fahrbahn und dem Geschwindigkeitscontroller.

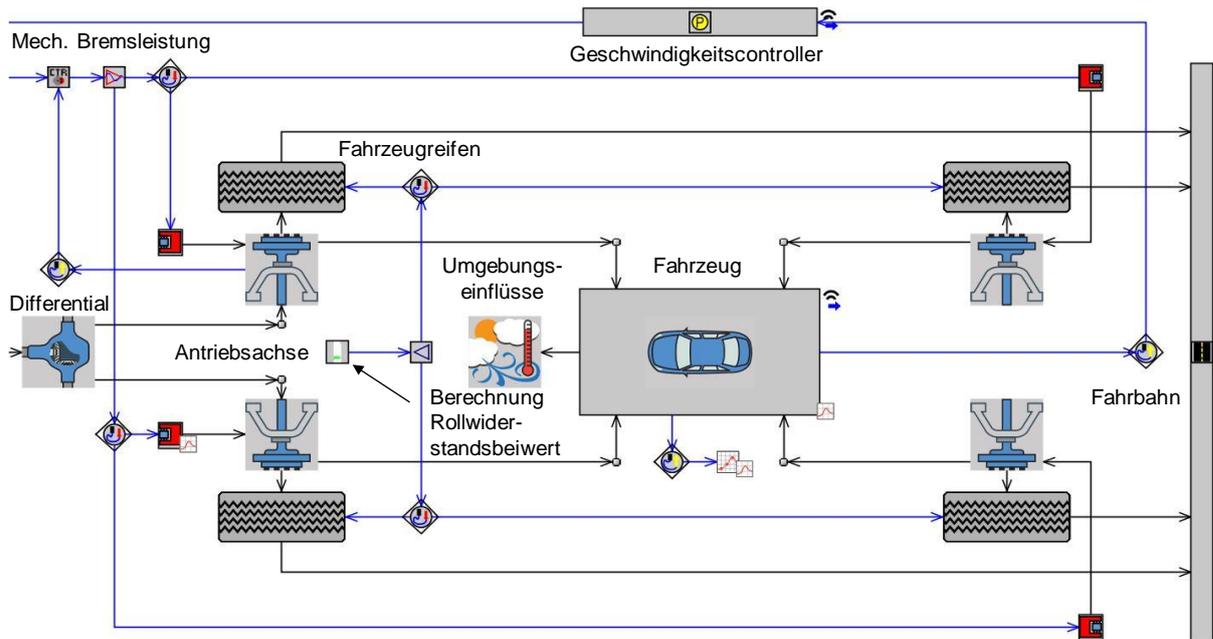


Abbildung 5-2 Submodell 1 - Aufbau der Fahrzeugarchitektur in GT-SUITE, Bild aus [92]

Das Fahrzeug wird für die Stützjahre 2015 und 2025 mit den ermittelten Fahrzeugeigenschaften, wie beispielsweise dem c_w -Wert, der Stirnfläche und der Fahrzeugmasse, segmentspezifisch parametrisiert. Die Reifen werden ebenfalls mit den in der Referenzfahrzeugbildung festgestellten Größen dimensioniert. Zudem erhalten die Reifen ihren situativen Rollwiderstandsbeiwert über das in dem Kapitel 4.5 beschriebene Reifenmodell in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Reifenschultertemperatur. Die Reifen übertragen die Antriebsenergie an eine definierte, ebene Straße. Das Fahrzeug ist ferner den Umweltbedingungen ausgesetzt. Über die Umgebungseinflüsse werden der Luftdruck, die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit zeitlich aufgelöst aufgeprägt und der Leistungsbedarf für die Überwindung der Luftwiderstandskräfte situativ berechnet. Über einen Geschwindigkeitscontroller wird sowohl mittels des Abgleichs der definierten Zyklusgeschwindigkeit (Sollgröße) zu der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit (Istgröße) als auch mittels den Fahrzeugeigenschaften und dem Antriebsstrangwirkungsgrad eine Lastanforderung berechnet. Je nach Geschwindigkeitsdifferenz ist diese positiv, das Fahrzeug muss beschleunigt werden, oder negativ, das Fahrzeug muss verzögert werden. Die berechnete Leistungsanfrage wird an das Submodell 2, dem elektrischen und mechanischen Aufbau des Antriebsstrangs, weitergegeben und dort verarbeitet. Neben der Leistungsanforderung und der Bremsensteuerung verbindet ein Differentialgetriebe die beiden Untermodelle.

Über das, in dem Kapitel 3.1.2 beschriebene, Vorgehen der Antriebsauslegung werden die Batteriefahrzeugvarianten den Rahmenbedingungen entsprechend konfiguriert. Die Tabelle 5-1 fasst die sich aus den definierten Prämissen ergebenden Komponenten- und Fahrzeugeigenschaften zusammen. Das Batteriefahrzeug aus dem ersten Segment ist mit einem Elektromotor mit einer maximalen Leistung von

66 kW ausgestattet, um die geforderten Beschleunigungs- und Höchstgeschwindigkeitswerte zu erreichen. Über ein Batteriesystem mit einem nutzbaren Energieinhalt von 20,7 kWh soll eine Reichweite größer als 170 km in dem NEFZ absolviert werden. Insgesamt wiegt das Fahrzeug gemäß der EWG-Richtlinie 92/21 [103] 1 191,6 kg. Die Fahrzeugvariante der Mittelklasse ist ca. 337 kg schwerer als das Pendant der Kleinst- und Kleinwagenklasse und hat eine Masse inkl. Fahrer und Gepäck von 1 528,9 kg. Das Batteriefahrzeug des zweiten Segments ist mit einem Batteriesystem mit einer Kapazität von 26,2 kWh ausgestattet und soll eine Fahrstrecke von 186,4 km in dem Zertifizierungszyklus zurücklegen. Angetrieben wird das Batteriefahrzeug der Mittelklasse mit einem Elektromotor mit einer maximalen Leistung von 91,8 kW. Das Batteriefahrzeug aus dem dritten Segment ist mit einer elektrischen Maschine mit einer maximalen Leistung von 182,6 kW versehen, um jene an das Oberklassenfahrzeug gestellten Leistungsanforderungen zu erzielen. Ein Batteriesystem mit einer Kapazität von 49,2 kWh wird verbaut und eine geforderte Reichweite größer als 300 km soll erreicht werden. Durch die resultierende Fahrzeugkonfiguration ergibt sich eine Fahrzeugmasse inkl. Fahrer und Gepäck von 2 007,5 kg.

Tabelle 5-1 Übersicht über die Parametrierung der BEV 2015 und der BEV 2025 Segmentfahrzeuge

Parameter	BEV 2015			BEV 2025			Einheit
	Seg-1	Seg-2	Seg-3	Seg-1	Seg-2	Seg-3	
Höchstgeschwindigkeit batterieelektrisch	132,5	140,0	180,0	150,0	160,0	180,0	km/h
Höchstgeschwindigkeit BZS / VM	-	-	-	-	-	-	km/h
Beschleunigungszeit 0 km/h - 100 km/h	12,6	10,5	7,2	12,3	10,1	7,0	s
Beschleunigungszeit 80 km/h - 120 km/h	10,1	8,7	4,9	9,9	8,6	4,5	s
Reichweite batterieelektrisch	170,0	186,4	300,0	300,0	400,0	500,0	km
Reichweite BZS / VM	-	-	-	-	-	-	km
Leistung Verbrennungsmotor (VM)	-	-	-	-	-	-	kW
Leistung Elektromotor	66,0	91,8	182,6	71,3	96,1	189,8	kW
Leistung Brennstoffzellensystem (BZS)	-	-	-	-	-	-	kW
Kapazität Batteriesystem	20,7	26,2	49,2	42,7	66,8	86,8	kWh
Masse Verbrennungsmotor	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Elektromotor	53,0	62,8	89,3	48,5	56,5	80,1	kg
Masse Brennstoffzellensystem	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Batteriesystem	171,2	224,7	418,3	269,4	427,1	551,6	kg
Masse Getriebe	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	kg
Masse Tanksystem	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Tankinhalt	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Abgassystem	-	-	-	-	-	-	kg
Masse verstärkter Unterboden	*	*	*	*	*	*	kg
Masse zusätzliche Kühlkreisläufe	20,3	22,6	31,5	25,7	32,3	40,6	kg
Masse elektrische Zusatzkomponenten	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	kg
Masse Karosserie	822,0	1 093,7	1 343,4	792,0	1 013,7	1 193,4	kg
Gesamtgewicht	1 116,6	1 453,9	1 932,5	1 185,5	1 579,7	1 915,7	kg
Gesamtgewicht nach EG	1 191,6	1 528,9	2 007,5	1 260,5	1 654,7	1 990,7	kg

* im Batteriesystem enthalten

Submodell 2 – Antriebsstrang mechanisch und elektrisch:

Das zweite Submodell erhält die Leistungsanforderung des Fahrzeugs aus der ersten Modulgruppe. Die Abbildung 5-3 stellt die weitere Verarbeitung der Anforderung und den Aufbau des Antriebsstrangs für die Umsetzung des Leistungsflusses dar. Die berechnete Leistungsanfrage wird zunächst in der Unterbaugruppe „Betriebszustände Bremsen / Beschleunigen“ weiterverarbeitet. In dieser wird geprüft, ob diese positiv oder negativ ist. Ist Ersteres zutreffend, das Fahrzeug soll beschleunigt werden, wird die Leistungsanforderung durch die aktuell verfügbare Leistung des Antriebssystems (verfügbare Batteriesystemleistung minus der aktuellen Nebenverbraucherleistung) geteilt durch den aktuellen Wirkungsgrad der elektrischen Antriebseinheit und die maximal mögliche mechanische Leistung limitiert. Ist die

ermittelt. Für die Segmentklasse groß werden die Leistungen für das Radio, das Abblend- und das Tagfahrlicht von der Fahrzeugvariante mittel übernommen. Die Leistung für eine Heckscheibenheizung wird bezogen auf deren Fläche des dritten Fahrzeugsegments skaliert. Der Leistungsbedarf der Scheinwerfer wird für das Prognosejahr 2025 angepasst. Dabei wird angenommen, dass LED-Lichter verwendet werden, welche zu einer Leistungsreduzierung des Lichts auf 30 W bzw. auf 11 W für das Abblend- bzw. für das Tagfahrlicht führen. Die Entscheidung, ob das Abblend- oder das Tagfahrlicht während der Fahrt eingeschaltet ist, wird in der Simulation über einen Grenzwert der solaren Strahlung gesteuert. Der dabei verwendete Strahlungswert wird festgelegt, indem überprüft wird, bei welchem Wert ein Sonnenuntergang bzw. ein Sonnenaufgang vorliegt. Der daraus ermittelte Wert liegt nach den beiden betreuten Studienarbeiten [112] und [115] bei 40 W/m^2 . Für das Bremslicht werden für das Betrachtungsjahr 2015 42 W [205] und für Prognosejahr 2025 11 W veranschlagt. Auch hier wird angenommen, dass in dem Prognosejahr 2025 LED-Lichter verbaut sind und die Leistungsaufnahme reduziert wird. Wird das Fahrzeug verzögert, wird die benötigte Leistung des Bremslichts verrechnet. Zusätzlich zu den beschriebenen Nebenverbrauchern wird die Leistung der Blinker und jene der Lenk- und der Bremsunterstützung nach [48] mit insgesamt 120 W statisch bilanziert. Neben den antriebsunabhängigen Verbrauchern werden die folgend genannten Nebenverbraucher situativ aufgenommen. Dazu zählen die Pumpen des Elektromotor- und des Batteriekühlkreislaufs, der Fahrzeuglüfter, das Gebläse, der Klimakompressor und die beiden Hochvoltheizer des Kabinen- und des Batteriekreislaufs. Die Leistungen der Niedervolt-Verbraucher werden über einen DC/DC-Wandler mit einem, als konstant angenommenen, Wirkungsgrad von 95% verrechnet. In dem Anhang 18 und in dem Anhang 19 ist eine Übersicht über die verwendeten Leistungen der Nebenverbraucher gegeben.

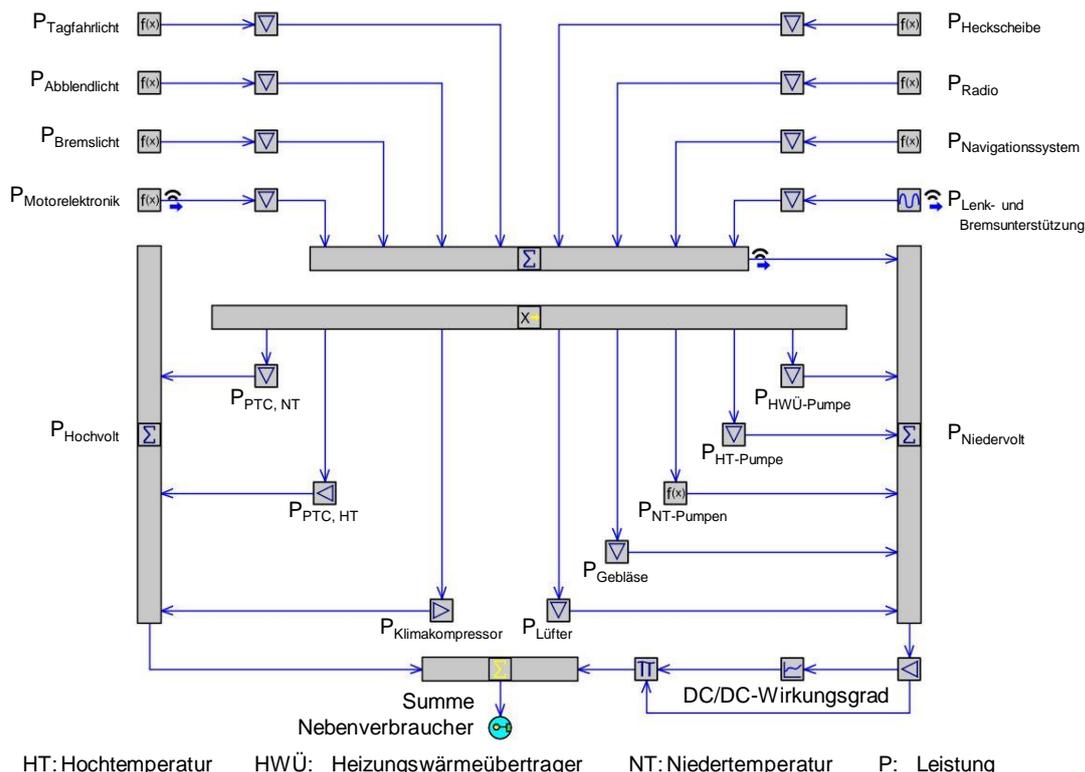


Abbildung 5-4 Modellierung der Nebenverbraucher der xEV-Modelle in GT-SUITE nach [115], Bild aus [92]

Die Summe der Antriebs- und der Nebenverbraucherleistung wird über das Batteriemanagementsystem an die Batterie weitergegeben. Dafür wird ein konstanter Wirkungsgrad von 98% angenommen [6]. Ist die Lastanforderung negativ, wird diese mit dem Wirkungsgrad multipliziert, ist diese positiv wird diese geteilt. Die erhöhte oder die erniedrigte Leistungsanfrage wird anschließend zu der Batterie weitergeleitet. Dabei wird die Batterie, je nach Last, ge- oder entladen. Das dabei verwendete Batteriesystem ist

wie in dem Unterpunkt 4.1 beschrieben aufgebaut. In Abhängigkeit der Stromstärke, der Zelltemperatur und des Ladezustands wird der Wirkungsgrad des Ent- oder des Beladens berücksichtigt. Durch eine verlustbehaftete Umsetzung der Leistung erwärmen sich die Komponenten des Antriebsstrangs und eine bedarfsgerechtes Thermomanagement des Antriebsstrangs ist notwendig, um einen sicheren Betrieb und eine Langlebigkeit der Komponenten zu gewährleisten.

Submodell 3 – Antriebsstrang thermisch:

In dem Submodell 3 ist das Thermomanagement des Antriebsstrangs aufgebaut. Dieses besteht bei einem Batteriefahrzeug aus dem Luftkanal in dem Motorraum, dem sog. Underhood, und den beiden Niedertemperaturkreisläufen des Elektromotors und der Batterie, vgl. dazu Abbildung 5-5.

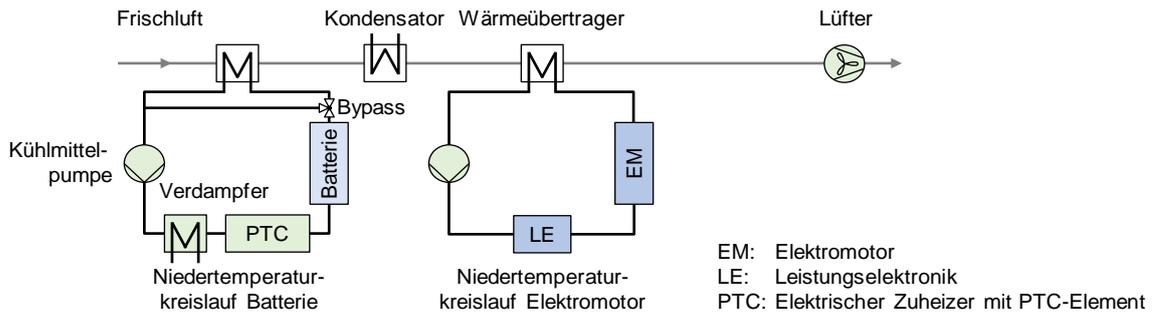


Abbildung 5-5 Schematischer Aufbau des Thermomanagements des Antriebsstrangs des BEVs

Kühlluftpad:

In der Abbildung 5-6 ist der Luftpfad für die Kühlung der Kreisläufe der Komponenten allgemein dargestellt. Zunächst durchläuft der, durch die Fahrzeuggeschwindigkeit oder durch den Lüfter, erzeugte Luftstrom den Batteriekühler, gefolgt von dem Klimakondensator und dem Kühler für den Kreislauf des Elektromotors. Der in dem Schaubild dargestellte Kühler des Hochtemperaturkreislau, für das Brennstoffzellensystem oder für den Verbrennungsmotor, ist bei dem Batteriefahrzeug nicht verbaut. Die Reihenfolge der Temperaturkreisläufe wird so gewählt, dass zunächst der Kreislauf mit dem niedrigsten und anschließend jener mit dem nächsthöheren Temperaturniveau durchströmt wird. Dabei ist, je nach Ausführung bzw. je nach Verlustleistung der Kreisläufe und deren Solltemperatur, die Geometrie der Kühler unterschiedlich. Durch die resultierende Anordnung und die benötigten Abmessungen der Kühler ergeben sich unterschiedliche Teilluftströme. Die Kühler werden dabei vollumfänglich oder partiell durchströmt. Eine resultierende Durchströmung und eine anschließende Zusammenführung des erwärmten und des unberührten Luftstroms in den nachfolgenden Kühler wird in dem Simulationsmodell abgebildet und eine partielle Durchströmung einzelner Kühler berücksichtigt.

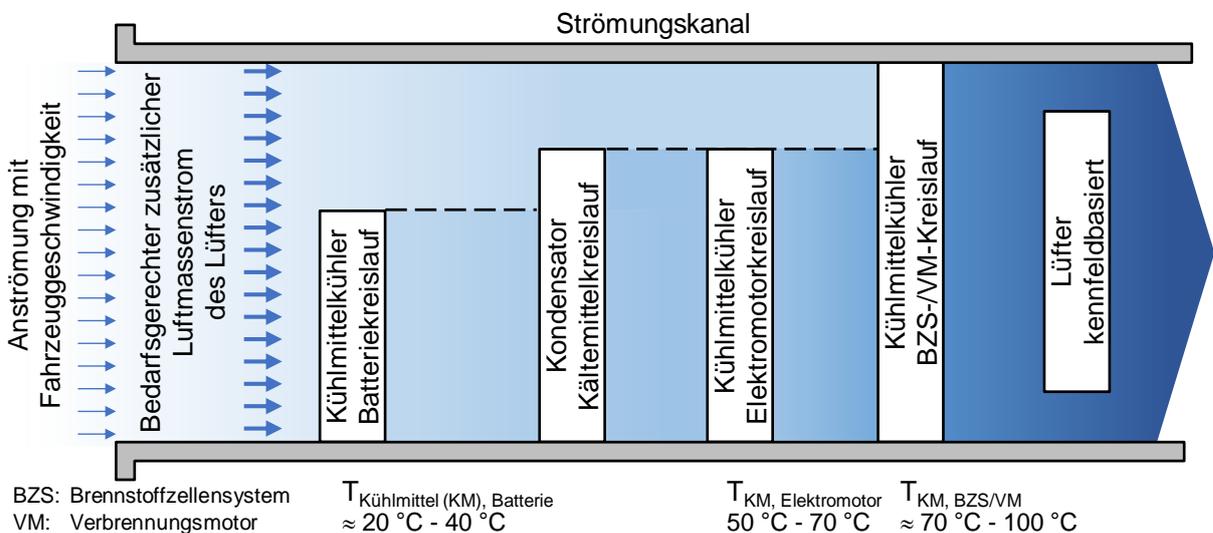


Abbildung 5-6 Schematische Darstellung der Fahrzeugdurchströmung in einem Underhood nach [206]

Der für die Kühlung der Komponenten benötigte Luftmassenstrom resultiert aus der Fahrzeuggeschwindigkeit oder einem Betrieb eines Lüfters. In dem Rahmen dieser Arbeit wird aus einer CFD-Simulation der Luftmassenstrom ohne und bei voller Leistung des Lüfters über der Fahrzeuggeschwindigkeit durch eine Fachabteilung der Firma Daimler AG bereitgestellt [207]. Die Abbildung 5-7 a) zeigt die beiden Massenströme und den zusätzlich möglichen Massenstrom bei einer vollen Leistung des Lüfters.

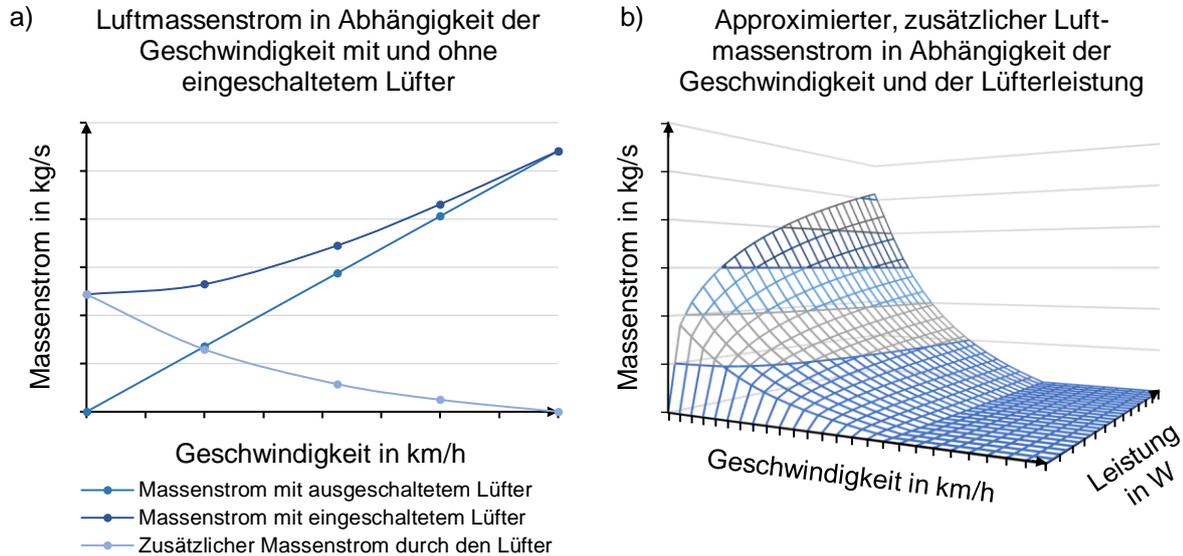


Abbildung 5-7 a) Luftmassenstrom in Abhängigkeit der Geschwindigkeit mit und ohne eingeschaltetem Lüfter und b) approximierter, zusätzlicher Luftmassenstrom in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Lüfterleistung, nach [112]

In dem korrespondierenden Diagramm ist zu erkennen, dass ab einer Geschwindigkeit von ca. 160 km/h der Lüfter keinen weiteren Beitrag zu dem Luftmassenstrom leistet. Ab dieser Geschwindigkeit wird der Lüfter überblasen. Der zusätzliche Luftmassenstrom, in Abhängigkeit der Lüfterleistung und der Fahrzeuggeschwindigkeit, muss in dem Bereich vor 160 km/h zwischen den beiden Kennlinien, Massenstrom mit ausgeschaltetem Lüfter und Massenstrom mit eingeschaltetem Lüfter, ermittelt werden, um in der Simulation den Luftmassenstrom und damit den Leistungsbedarf des Lüfters bedarfsgerecht abzubilden. Eine, in einer angeleiteten, studentischen Arbeit [112], entwickelte Methode wird dazu angewandt. Bei der verwendeten Methode wird der physikalische Zusammenhang zwischen der Leistung und dem Druckverlust herangezogen, ineinander eingesetzt und nach dem Massenstrom aufgelöst. In diesem Zusammenhang ergibt sich die Beziehung

$$\frac{dm}{dt} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot A^2 \cdot \rho^2}{\zeta} \cdot P} \approx \sqrt[3]{C \cdot P} \quad (5-1)$$

mit einer kubische Wurzelfunktion für die Abhängigkeit des Massenstroms $\frac{dm}{dt}$ von der Leistung P , dem Strömungsquerschnitt A , der Luftdichte ρ und dem Druckverlustbeiwert ζ . Bei der Umsetzung des Zusammenhangs wird vereinfacht angenommen, dass der Druckverlustbeiwert für jede Fahrzeuggeschwindigkeit annähernd konstant bleibt, obwohl dieser beispielsweise von der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Reynoldszahl abhängig ist. Mit der gewählten Vereinfachung wird eine Konstante C gebildet und der, von dem Lüfter, zusätzlich erzeugte Massenstrom berechnet. Die Abbildung 5-7 b) stellt den verwendeten Zusammenhang grafisch dar. Die beschriebene Vereinfachung für die Ermittlung des zusätzlichen Massenstroms, in Abhängigkeit der Leistung des Lüfters, wird aufgrund des Fehlens weiterer CFD-Daten verwendet. Aus [112] geht jedoch hervor, dass die damit erzielbare Genauigkeit für eine Gesamtfahrzeugsimulation als hinreichend genau angenommen werden kann. [112]

Neben einer bedarfsgerechten Berechnung der Leistung des Lüfters und einem daraus resultierenden Luftmassenstrom müssen die verbauten Kühler segmentspezifisch modifiziert werden. Über eine variable Höhenausführung der Kühler wird die Durchströmungsfläche der Kühler den Verlustleistungen der Komponenten in dem korrespondierenden Kühlmittelkreislauf angepasst, um die Kühlergeometrie den jeweiligen Eigenschaften anzupassen. Dazu wird, basierend auf originalen Kühlereigenschaften, für die Kühlkreisläufe des Batteriesystems, des Elektromotors, der Brennstoffzelle und des Verbrennungsmotors die Funktion der Skalierung eines Kühlers in der Simulationssoftware GT-SUITE genutzt. Als Skalierungsfaktor dient dabei jeweils das Verhältnis der Verlustleistung der definierten Ausführung zu der praktisch umgesetzten Referenzkonfiguration. Durch die anwendungsgerechte Skalierung wird sichergestellt, dass die Kühlerausführungen und deren Flächen möglichst realen Geometrien entsprechen und auch in einem Extremfall eine ausreichende Kühlung gewährleisten.

Der benötigte Luftmassenstrom für die Kühlung - und somit in einem Bedarfsfall auch die benötigte Leistung des Lüfters - wird über die Solltemperaturen der Kreisläufe und den Wärmeeintrag des Kondensators bestimmt. In dem Rahmen dessen wird für jeden Kreislauf einzeln geprüft, ob dessen Temperatur über der Solltemperatur liegt und das natürliche Kühlpotenzial, beispielsweise die Bypass-Stellung des NT-Kreislaufs, voll ausgeschöpft wird. Sind die frei verfügbaren Kühlmöglichkeiten ausgenutzt und wird dennoch die Solltemperatur überschritten, wird das entsprechende Verhältnis der Ist- zu der Solltemperatur gebildet und der Kühlbedarf je Kühlkreislauf ermittelt. Mit der Kenngröße des höchsten Bedarfs wird anschließend ein PID-Regler⁴⁵ parametrisiert und der zusätzliche Massenstrom so geregelt, dass sich die Solltemperatur des Kreislaufs einstellt. Dazu wird dem Regler variabel die Ist- und die Sollgröße des Kreislaufs mit dem momentan höchsten Bedarf vorgegeben. Aufgrund einer resultierenden Leistungsanfrage an den Lüfter wird die Drehzahl des Lüfters eingeregelt. Ändert sich der Kühlbedarf, wird die Regelung des Lüfters angepasst. Bei einem Herunterregeln wird die Trägheit des Lüfters berücksichtigt, indem eine definierte Änderungsrate in dem Modell hinterlegt ist. Neben einer bedarfsgerechten Regelung ist zudem eine Steuerung des Luftmassenstroms verbaut. Ist die Fahrzeuggeschwindigkeit kleiner als 20 km/h und wird die Fahrgastzelle oder das Batteriesystem währenddessen aktiv gekühlt, wird der Lüfterpauschal mit 200 W betrieben, um eine ausreichende Kühlleistung des Kondensators zu gewährleisten.

Kühlmittelkreislauf Batteriesystem:

Die Abbildung 5-8 stellt den Kühlmittelkreislauf des Batteriesystems dar. Der Kreislauf besteht aus einem Wärmeübertrager, einem Ausgleichsbehälter (in der vereinfachten Abbildung nicht dargestellt), einer Kühlmittelpumpe, einem Verdampfer, einem elektrischen Heizer, einer Batterieanbindung und einem Bypass, welcher den Kühlmittelstrom durch oder an dem Wärmeübertrager vorbei leitet.

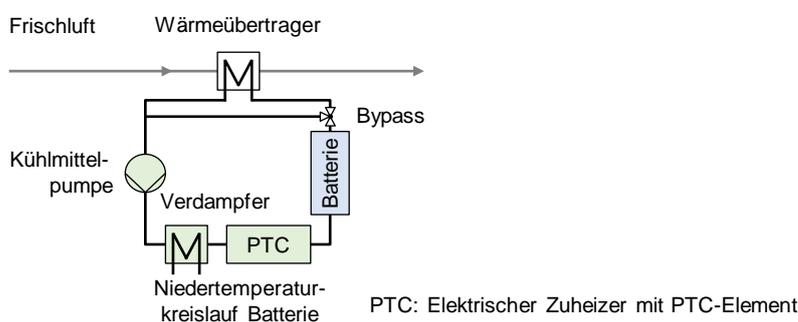


Abbildung 5-8 Schematische Darstellung des angewandten Aufbaus des Batterie-Kühlmittelkreislaufs

Das Ziel des gezeigten Kühlkreislaufs ist es die Temperatur des Batteriesystems auf dessen Komfortbereich, wie in dem Kapitel 2.5.1 in der Tabelle 2-2 gezeigt, zu regeln. Ist dabei die Umgebungstemperatur höher als die Solltemperatur des Batteriesystems, wird der Wärmeübertrager, ebenso wie bei dem

⁴⁵ PID-Regler: Ein Regler bestehend aus einem proportionalen, einem integralen und einem differentiellen Glied.

Aufwärmen der Batterie bei einem zu kalten Luftstrom und einer zu niedrigen Batterietemperatur, umgangen. Liegt die Starttemperatur der Batterie unterhalb von 0 °C, wird ein elektrischer Zuheizung verwendet, um diese auf 5 °C zu erwärmen. Der Grenzwert von 0 °C wird angewandt, da unterhalb dieser Temperaturgrenze unter anderem Lithium-Plating einsetzen und eine geringe Rekuperationsleistung zu der Verfügung stehen kann. Der restliche Temperaturanstieg bis zu der optimalen Betriebstemperatur der Batterie wird durch die eigens verursachte Verlustleistung erreicht. Ist der Sollzustand vorherrschend, wird durch eine Regelung des Massenstroms der Kühlmittelpumpe versucht diesen beizubehalten. Übersteigt die momentane Temperatur den Sollwert der Temperatur dennoch, beispielsweise aufgrund einer hohen Außentemperatur oder einer hohen Verlustleistung, aufgrund einer konstant hohen Leistungsanforderung, wird der Kältemittelkreislauf zusätzlich eingeschaltet und über einen Verdampfer die Temperatur der Batterie eingeregelt. Die dabei maximal mögliche Kälteleistung wird auf 2,5 kW beschränkt. Das Batteriesystem ist durch eine Vielzahl von Batteriemodule aufgebaut, vgl. dazu Kapitel 4.1. Diese sind mittels Flachrohrkühler an das Kühlmittel angebunden. Das Kühlfliuid durchströmt die Module parallel mit einem über das Zellverhältnis aufgeteilten Kühlmittelmassenstrom.

Kühlmittelkreislauf Elektromotor und Leistungselektronik:

Der Kühlmittelkreislauf des Elektromotors und der Leistungselektronik ist prinzipiell ähnlich jenem des Batteriesystems aufgebaut. Aufgrund einer relativ großen Temperaturunabhängigkeit hat der Kreislauf keinen elektrischen Zuheizung, keinen Verdampfer und keinen Bypass. Der Kreislauf des Elektromotors wird über die Verlustleistung der Komponenten aufgewärmt. Dabei wird die elektrische Antriebseinheit, wie in dem Kapitel 4.3 beschrieben, simuliert. Zusätzlich wird die angenommene Verlustleistung des DC/DC-Wandlers als direkter Wärmeeintrag in den Kühlmittelkreislauf modelliert. Erwärmt sich der Kreislauf auf über 50 °C, wird der Massenstrom der Pumpe erhöht und mit einer Hysterese auf diese Temperatur geregelt.

Kühlmittelkreislauf Kabinenheizung:

Neben den Kühlmittelkreisläufen für die Komponenten des Antriebs ist bei dem simulierten Elektrofahrzeug für das Betrachtungsjahr 2015 ein Wasser-Glykol-Kreislauf für die Heizung der Kabine verbaut. In diesem befinden sich ein Hochvolt-PTC mit einer Leistung von bis zu 6 kW und eine Kühlmittelpumpe, welche den Massenstrom regelt. Über die Heizleistung des elektrischen Zuheizers wird das Kühlmittel erwärmt und ab einer Temperatur von 35 °C über einen Heizungswärmeübertrager geleitet. Dieser wird von einem Luftstrom zu der Kabine durchströmt, welcher dabei Wärme aufnimmt. Der eingebaute, elektrische Heizer ist dabei so geregelt, dass dieser sowohl in einem Heiz- als auch in einem Reheat-Fall ausreichend Wärme zu der Verfügung stellt. Die Regelung des elektrischen Heizers erfolgt dabei mit einem PID-Regler, welcher in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur die Rücklauftemperatur des Wärmeübertragers kühlmittelseitig einregelt. Über den Wärmetransfer des Wärmeübertragers ist das dritte mit dem vierten Submodell, dem Thermomanagement der Fahrgastzelle, verbunden.

Submodell 4 – Fahrgastzelle thermisch:

Das vierte Submodell beschreibt das Thermomanagement der Fahrgastzelle. Diese Unterbaugruppe setzt sich durch die Teilsysteme Fahrgastzelle, Frischluftsteuerung, Gebläse-, Verdampfer- und Bypass-Regelung, Kanalverluste und Luftführung zusammen, siehe Abbildung 5-9 a). Des Weiteren ist die, in dem Unterkapitel 4.6 beschriebene, Berechnung des Kältemittelkreislaufs berücksichtigt. Die Fahrgastzelle ist als eindimensionale Kabine modelliert, vgl. Kapitel 4.6. Die Eigenschaften der Fahrgastzelle werden anhand realer Fahrzeugkenngrößen parametrisiert. Die Zufuhr des Luftstroms zu der Kabine erfolgt generell mit oder ohne Frischluftanteil. Energetisch betrachtet ist nach einem ersten Austausch der Luft der Umluftbetrieb sinnvoll, da in diesem beispielsweise in dem Aufheizfall die bereits einmal erwärmte Luft wiederverwendet wird und keine Frischluft mit niedriger Temperatur aufgewärmt werden muss. Ein initiales Durchblasen der Kabine mit 100 % Frischluft ist in Kühlfällen sinnvoll, wenn die Außentemperatur niedriger als die vorherrschende Temperatur in der Fahrgastzelle ist. In dem Simulationsmodell wird deshalb ein effizientes, anfängliches Austausch des Luftvolumens immer durchgeführt, sofern die Kabinentemperatur über der Solltemperatur plus einem Grad Kelvin liegt und die aktuelle Außentemperatur niedriger als die Kabinentemperatur ist. Sobald sich dieser definierte Zustand

ändert, sich entweder die Kabinentemperatur bis auf eine Differenz von einem Grad Kelvin der Solltemperatur annähert oder ein partieller Umluftbetrieb aufgrund einer niedrigeren Lufttemperatur in dem Vergleich zu der Umgebungstemperatur effizienter ist, wird der Modus „Durchblasen“ der Kabine verlassen und ein gesteuerter Umluftbetrieb angewandt. Wie bereits vorangehend erwähnt, ist ein nahezu vollständiger Umluftbetrieb energetisch betrachtet häufig sinnvoll. Dies ist aber nur begrenzt möglich, da zu dem einen die CO₂-Konzentration durch den Ausstoß der Insassen steigt und zu dem anderen bei niedrigen Außentemperaturen die Gefahr eines Beschlags der Scheiben aufgrund des Auskondensierens des Wassergehalts der warmen und feuchten Umluft an den kalten Scheiben besteht. Das Luftvolumen einer Kabine muss deshalb 100 bis 150 Mal pro Stunde ausgetauscht werden [208]. Für das Umgehen der beiden genannten Gefahren können Sensoren zu der Messung der Luftfeuchtigkeit [209] und des CO₂-Gehalts [210] eingesetzt und die Umluftrate abhängig davon gesteuert werden. In dieser Arbeit wird auf eine bereits durchgeführte Simulation zurückgegriffen und der Anteil der Frischluft über die maximale Umluftrate nach Schüppel [197] in Abhängigkeit der Außentemperatur leicht modifiziert verwendet, siehe Abbildung 5-9 b). Werte mit einer maximalen Umluftrate größer als 80 % werden auf diesen Wert limitiert, da laut [211] bei einer Umluftrate größer als 80 % Strömungswalzen auftreten können und dadurch der hintere Fahrgastzellenbereich nicht mehr ausreichend klimatisiert wird.

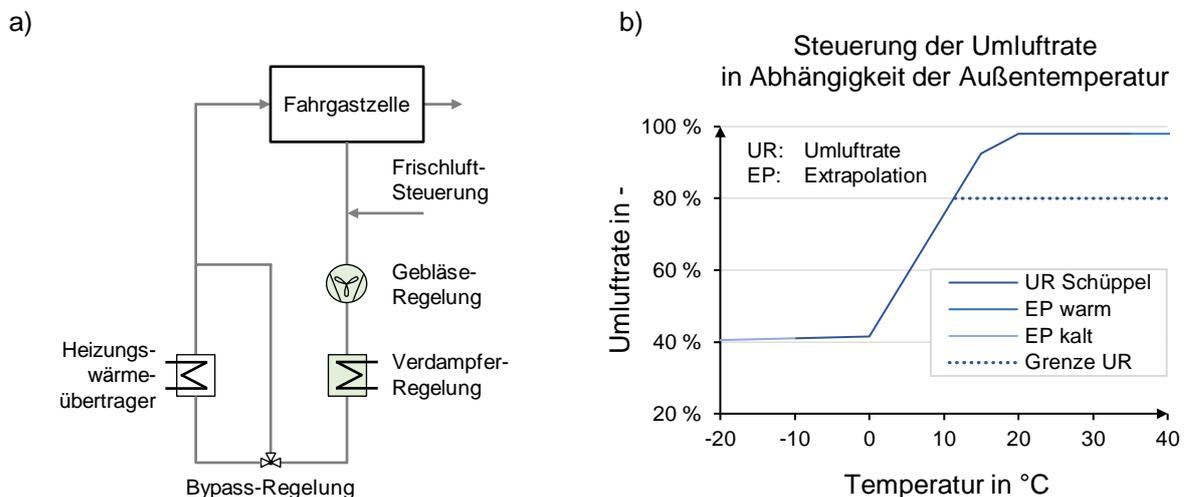


Abbildung 5-9 a) Schematische Darstellung des Submodells „Fahrgastzelle thermisch“ des BEVs und b) Steuerung der Umluftrate in Abhängigkeit der Außentemperatur modifiziert nach [197]

Mit einer Steuerung des Frischluftanteils und der in Abbildung 5-10 a) gezeigten Solltemperatur der Kabine nach [198] wird das Zusammenspiel der HVAC⁴⁶-Einrichtung, in welchem die Temperaturabweichung der Kabinenluft zu der Komforttemperatur bewertet wird, geregelt. Generell wird dabei zwischen vier Klimatisierungsfällen unterschieden. Diese sind „Durchblasen“, „Heizen“, „Kühlen“ oder „Reheat“. Erst genannter Modus wird wie bereits beschrieben angewandt. In dem zweiten Fall, dem Heizfall, liegt die Kabinentemperatur unterhalb der Solltemperatur und ein Heizbedarf ist vorhanden. Der Bypass der Klimaregelung wird dabei so geregelt, dass dieser, sobald eine Wärme an dem Heizungswärmeübertrager vorhanden ist, in dessen Richtung steht. Ist dies zutreffend, durchströmt der Luftstrom den Wärmeübertrager und erwärmt sich dabei. Ist an dem Heizungswärmeübertrager ausreichend Wärme vorhanden, erhöht das Gebläse die Drehzahl und wärmt die Kabine auf. Durch einen PID-Regler wird der Luftmassenstrom basierend auf der Temperaturdifferenz zwischen der Ist- und der Solltemperatur eingeregelt. Erreicht dieser dabei den Minimalwert des Massenstroms und steigt die Kabinentemperatur dennoch weiter an, ändert sich die Bypass-Stellung und der Bypass-Regler übernimmt das Einregeln der Kabinentemperatur bei einem minimalen Massenstrom des Gebläses. Durch die Kombination einer initialen Regelung und einer anschließenden Steuerung ist gewährleistet, dass der Massenstrom des Gebläses zeitnah minimal, die Leistungsaufnahme reduziert und der akustische Komfort erhöht wird. Ist

⁴⁶ HVAC: Engl. heating, ventilation and air conditioning. Z. Dt. Heizung, Lüftung und Klimatechnik.

die Kabinentemperatur initial höher als die Solltemperatur und liegt somit ein Kühlfall vor, wird der Heizungswärmeübertrager komplett umgangen und der Luftstrom durch den Verdampfer abgekühlt. Die Kälteleistung des Verdampfers wird dabei so eingeregelt, dass sich eine Austrittstemperatur des Verdampfers von 2 °C bis 8 °C einstellt. Dabei wird der untere Grenzwert der Austrittstemperatur aufgrund der Gefahr einer Vereisung und die obere Temperaturschwelle aufgrund einer Möglichkeit einer Geruchsbildung verwendet [4]. Wie in der Abbildung 5-10 b) dargestellt, wird die Austrittstemperatur in Abhängigkeit der Bypass-Stellung und in Abhängigkeit des Massenstroms geregelt, vgl. hierzu [112].

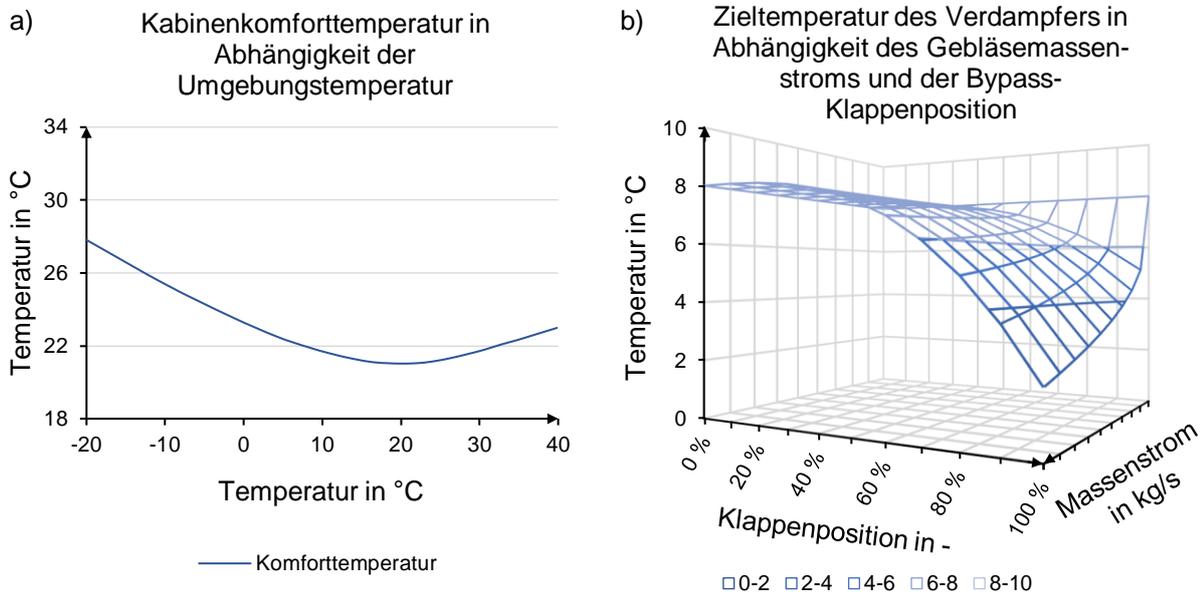


Abbildung 5-10 a) Darstellung der Kabinenkomforttemperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur nach [198] und b) variable Zieltemperatur des Kabinenverdampfers in Abhängigkeit des Gebläsemassenstroms und der Bypass-Klappenposition nach [112]

Bei einem erhöhten Massenstrom wird die Austrittstemperatur des Verdampfers reduziert, um einen möglichst schnellen Abkühlvorgang zu gewährleisten. Ist der Abkühlvorgang der Kabine fortgeschritten, die aktuelle Kabinentemperatur dem Sollwert angenähert, und erniedrigt sich dadurch der Luftmassenstrom, wird die Verdampfungstemperatur angehoben, um den Energiebedarf zu reduzieren. Wird in einem reinen Kühlfall der Heizungswärmeübertrager vollständig umgangen, die Klappenposition ist bei 100 %, ist die Austrittstemperatur des Verdampfers am niedrigsten. Verändert sich die Klappenposition in Richtung des Wärmeübertragers, beispielsweise in einem Reheat-Fall, steigt diese an, um den Energieaufwand zu reduzieren. Die beschriebene Skalierung der Austrittstemperatur des Verdampfers wurde zusammen mit Korb [112] entwickelt. Strömt der Luftmassenstrom durch den Verdampfer, wird dieser abgekühlt. Folglich erhöht sich die relative Luftfeuchtigkeit. Wasser kann auskondensieren und muss abgeführt werden. Dieser Effekt ist besonders für den vierten Klimatisierungsfall, dem Reheat-Fall, relevant. Bei diesem wird zunächst die Luft abgekühlt, Wasser auskondensiert und anschließend die Luft wieder erwärmt. Dies ist situativ notwendig, um die Luftfeuchtigkeit zu verringern und die Gefahr einer Bildung eines Beschlags zu reduzieren. Aufgrund eines doppelten Energieaufwands, zunächst Kühlen und anschließend Heizen, ist der Reheat-Fall als energieintensiv zu betrachten. Mittels eines Feuchtigkeits- und eines Temperatursensors wird der Taupunkt und die minimale Temperatur der Scheiben ermittelt und bei einer Annäherung auf 3 K der Reheat-Fall durchgeführt, um die Gefahr eines Beschlages auszuschließen. Ist der Verdampfer einmal an, verbleibt dieser aktiv, um eine mögliche Geruchsbildung zu vermeiden. Die einzuregelnde Komforttemperatur der Fahrgastzelle ist abhängig von der Umgebungstemperatur. Die Abbildung 5-10 a) stellt diese über der Außentemperatur dar. Ist die Temperatur der Umgebung niedriger oder höher als ca. 20 °C, steigt der Sollwert der Kabinentemperatur an, um den Komfort des Insassen zu erhöhen.

5.1.2 Batteriefahrzeug 2025

Das für die Simulation herangezogene Batteriefahrzeug für das Prognosejahr 2025 basiert auf dem beschriebenen Simulationsmodell für das Betrachtungsjahr 2015, beinhaltet aber auch relevante Änderungen. Die durchgeführten Modellanpassungen werden folgend detailliert erklärt und teilweise anhand des, in der Abbildung 5-11 dargestellten, generellen Aufbaus des BEVs 2025 beschrieben.

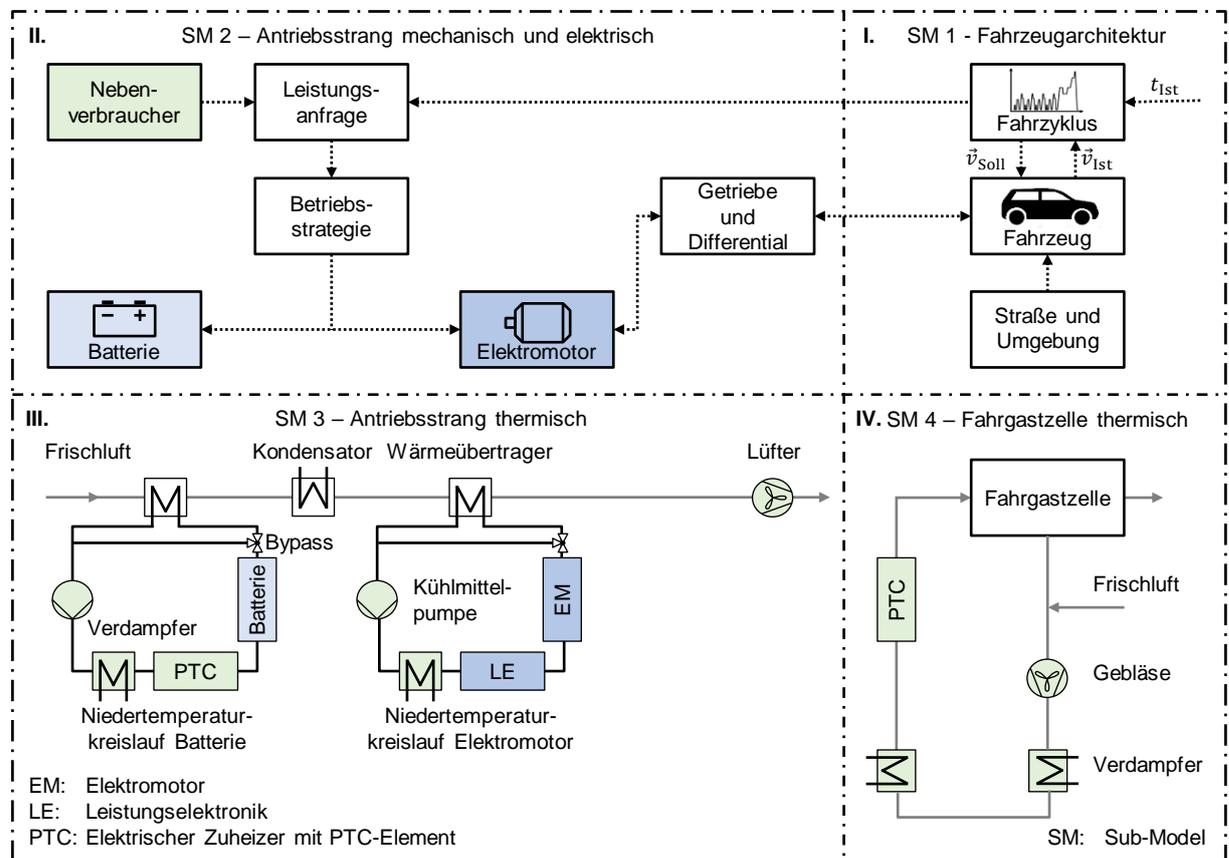


Abbildung 5-11 Schematischer Aufbau der Antriebsstrangvariante Batteriefahrzeug 2025 nach [115]

Submodell 1 – Fahrzeugarchitektur:

Der schematische Aufbau der Fahrzeugarchitektur des batterieelektrischen Pkws des Prognosejahrs 2025 ist identisch zu jenem des Betrachtungsjahrs 2015. Aufgrund der Weiterentwicklung der Fahrzeug- und der Komponenteneigenschaften und den angepassten Prämissen der Auslegung verändert sich die Parametrierung in dem Vergleich zu dem Betrachtungsjahr 2015. Die Tabelle 5-1 auf der Seite 128 stellt die resultierenden Fahrzeugeigenschaften des Prognosejahrs 2025 der Fahrzeugkonfiguration des Betrachtungsjahrs 2015 gegenüber. Das BEV des ersten Segments des Jahres 2025 wird von einem Elektromotor mit einer maximalen Leistung von 71,3 kW angetrieben. Eine nutzbare Batteriekapazität von 42,7 kWh wird verbaut, um in dem für das Prognosejahr 2025 angenommenen, gültigen Zertifizierungszyklus, dem WLTC, eine Reichweite von mindestens 300 km zurückzulegen. Durch diese Fahrzeugkonfiguration ergibt sich eine Gesamtmasse nach der Richtlinie 92/21 EWG [103] inkl. Fahrer und Gepäck von 1 260,5 kg. Das BEV des zweiten Segments ist ca. 395 kg schwerer als die Antriebsvariante des Segments Klein- und Kleinwagen und wiegt nach der Richtlinie 92/21 EWG [103] 1 654,7 kg. In der Variante des Mittelklassefahrzeugs ist ein Elektromotor mit einer maximalen Leistung von 96,1 kW verbaut, um alle Leistungsanforderungen zu erfüllen. Zudem ist ein Batteriesystem mit einer nutzbaren Kapazität von 66,8 kWh installiert, um eine Reichweite von mindestens 400 km in dem Zertifizierungszyklus zu realisieren und somit die Reichweitenanforderung zu erfüllen. Die mögliche Fahrdistanz der Mittelklassevariante wird in dem Batteriefahrzeug der Oberklasse um 100 km erweitert. Mit einer Batteriekapazität von 86,8 kWh sollen 500 km erreicht werden. In dem dritten Segment des

BEVs wird ein Elektromotor mit einer maximalen Leistung von 189,8 kW verbaut, um trotz einer Fahrzeugmasse nach der Richtlinie 92/21 EWG [103] von 1990,7 kg die geforderten Performanceeigenschaften zu erreichen. Für die Bewegung der Batteriefahrzeugvarianten wird in dem ersten Submodell analog zu dem Betrachtungsjahr 2015 eine Leistungsanforderung berechnet. Diese wird in dem zweiten Submodell, wie bereits in dem Unterpunkt 5.1.1 beschrieben, weiterverarbeitet.

Submodell 2 – Antriebsstrang mechanisch und elektrisch:

Der elektrische und der mechanische Aufbau des Antriebsstrangs eines Batteriefahrzeugs besteht hauptsächlich aus der elektrischen Antriebseinheit und dem Batteriesystem. Folglich ist der Aufbau schematisch identisch zu der Ausführung des BEVs des Betrachtungsjahrs 2015. Für das Prognosejahr 2025 werden die verwendeten Komponenteneigenschaften aufgrund deren Weiterentwicklung, wie in dem Kapitel 3.3 beschrieben, modifiziert. Die Leistungsdichte der elektrischen Antriebseinheit steigt dabei ebenso wie die Energiedichte der Batteriezelle an. Besonders die Verbesserung des Letztgenannten ist dabei hervorzuheben, da sich diese durch die prognostizierte Entwicklung um knapp 36 % erhöht. Neben einer angenommenen Komponentenentwicklung werden zudem die Nebenverbraucher und deren Leistungsaufnahme, wie in dem Abschnitt 5.1.1 dokumentiert, angepasst.

Submodell 3 und 4 – Antriebsstrang und Fahrgastzelle thermisch:

Das dritte und das vierte Submodell werden in dem Vergleich zu der angenommenen Ausführung in dem Betrachtungsjahr 2015 signifikant modifiziert. In der betreuten studentischen Arbeit [212] wird anstatt des bisher verbauten Thermomanagements ein System mit einer Wärmepumpenlösung erarbeitet. Die Abbildung 5-12 stellt die beiden Thermomanagementlösungen 2015 und 2025 gegenüber.

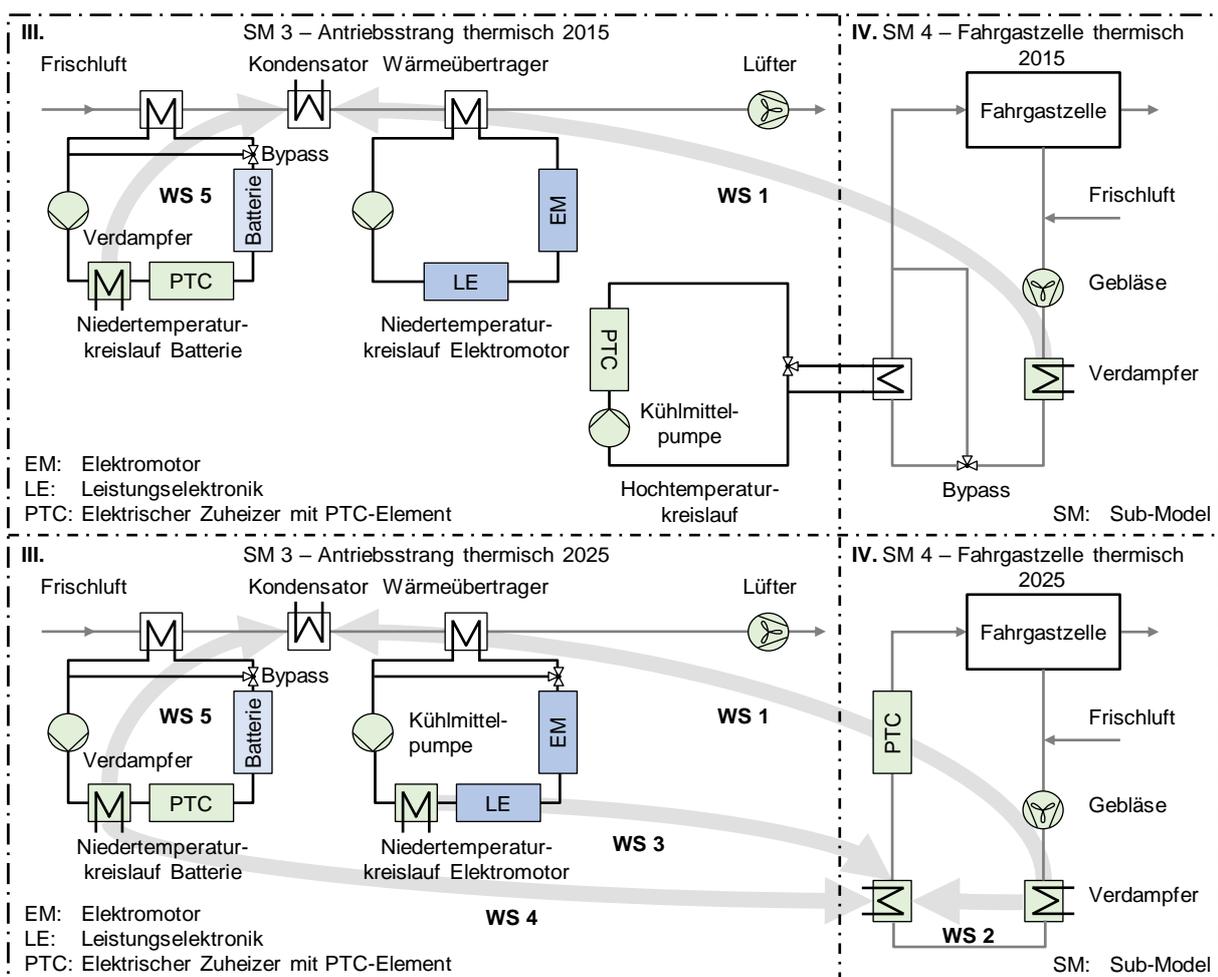


Abbildung 5-12 Vergleich des schematischen Aufbaus des dritten Submodells BEV 2015 mit jenem des BEVs 2025 nach [213]

Werden die verschiedenen Systeme des Thermomanagements des Betrachtungsjahrs 2015 und des Prognosejahrs 2025 verglichen, so fällt auf, dass der Niedertemperaturkreislauf des Batteriesystems immer noch die gleichen Komponenten enthält. Zudem ist ersichtlich, dass der Kühlkreislauf der elektrischen Antriebseinheit um einen Verdampfer und um einen Bypass des Wärmeübertragers erweitert ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Hochtemperaturkreislauf mit einem Wasser-PTC für das Aufheizen der Fahrgastzelle entfernt wurde und stattdessen ein Kondensator und ein Luft-PTC in dem Kabinenkreislauf verbaut ist. Die durchgeführten Abänderungen und gewählten Anpassungen sind anhand der Prämissen der Nutzung möglichst vieler Wärmequellen, der Maximierung der Effizienz der Wärmeübertragung, der Minimierung des Bauteilaufwands und der Kosten- bzw. der Verschleißreduzierung gewählt. Eine detaillierte Beschreibung des Auswahlprozesses und des Systemaufbaus ist in der betreuten studentischen Arbeit [212] zu finden. [212]

In dem Zusammenhang mit dem angepassten Aufbau des Thermomanagements wird eine neue Betriebsstrategie implementiert. Die in der Tabelle 5-2 gezeigten Ein- und Ausgabegrößen und deren Variablenbezeichnungen werden dazu definiert, um die neue Wärmepumpenbetriebsstrategie umzusetzen. [212]

Tabelle 5-2 Ein- und Ausgabegrößen der Wärmepumpenbetriebsstrategie 2025 nach [212]

Eingangsgröße	Variablen -bezeichnung	Ausgangsgröße	Variablen -bezeichnung
Verdampferleistung der Kabine	$P_{VD_{Kab}}$	Verdampferleistung der Kabine (nächster Zeitschritt)	$P_{VD_{Kab,neu}}$
Maximaltemperatur des NT2-Kreislaufs	T_{max}	Verdampferleistung des NT1-Kreislaufs	$P_{VD_{NT1}}$
Mittlere Temperatur der Batteriezellen	T_{NT2}	Verdampferleistung des NT2-Kreislaufs	$P_{VD_{NT2}}$
Anforderungsleistung der Kabine	P_{Anf}	PTC-Heizleistung	P_{PTC}
Anforderungsleistung des NT1-Kreislaufs	P_{NT1}	Kondensatorleistung des Underhoods	$P_{KD_{UH}}$
Anforderungsleistung des NT2-Kreislaufs	P_{NT2}	Kondensatorleistung der Kabine	$P_{KD_{Kab}}$
Zustand Reheat	<i>Reheat</i>	Verdampferzustand des NT1-Kreislaufs	VD_{NT1}
Thermischer Zustand des NT1-Kreislaufs	$Potential_{NT1}$	Verdampferzustand des NT2-Kreislaufs	VD_{NT2}
Thermischer Zustand des NT2-Kreislaufs	$Potential_{NT2}$	Verdampferzustand der Kabine	VD_{Kabine}
Elektrische Verdichterleistung	P_t	Elektrische Verdichterleistung (nächster Zeitschritt)	$P_{t,neu}$
Maximale Leistung des Luft-PTCs (NV-PTC)	$P_{PTC,max}$	-	-

In der in der Abbildung 5-13 auf der Seite 140 wird die angewandte Betriebsstrategie der Wärmepumpe des Prognosejahrs 2025 gezeigt.

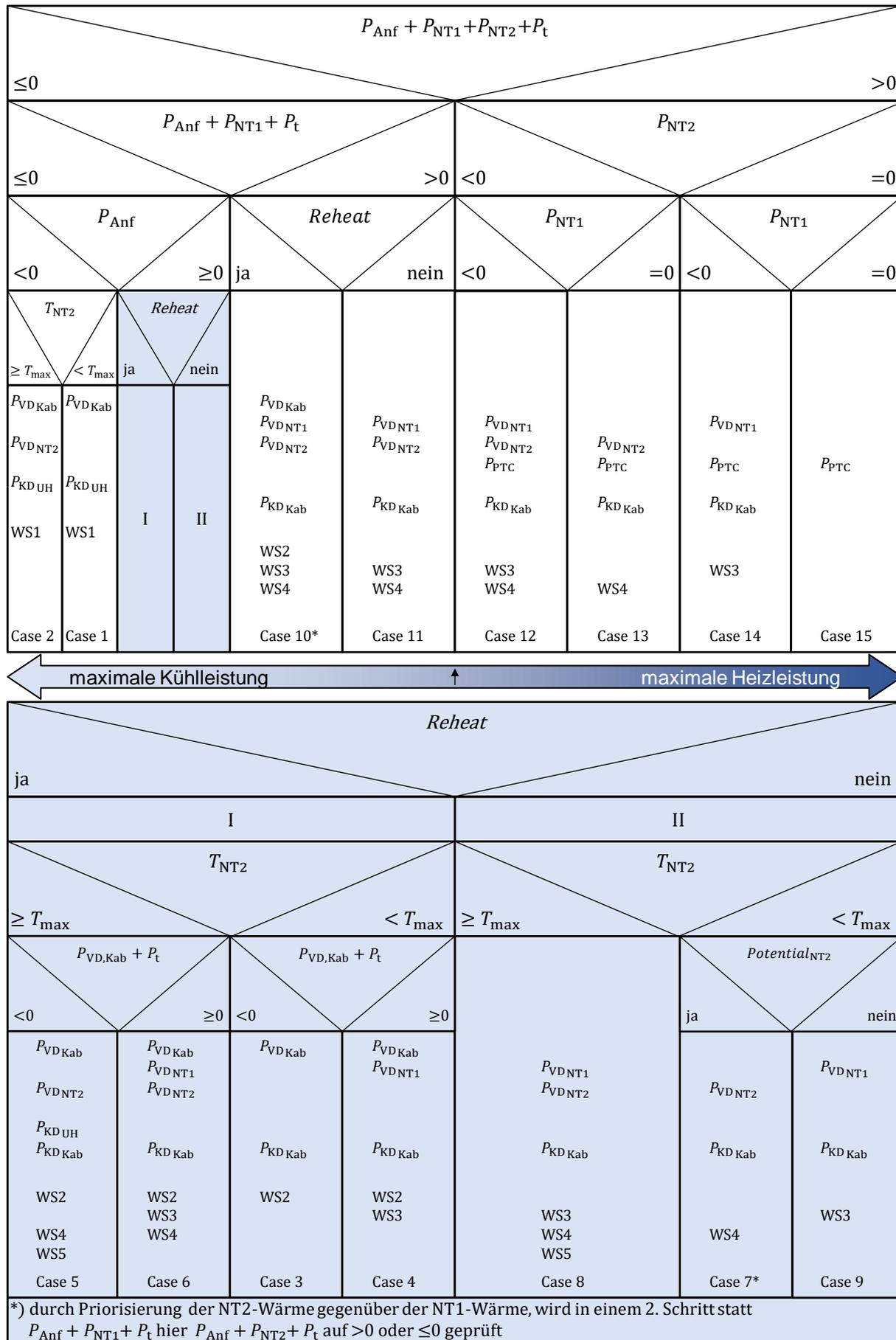


Abbildung 5-13 Schematische Darstellung der Betriebsstrategie der Wärmepumpe 2025 nach [212]

In der gezeigten Betriebsstrategie werden jene, in der Abbildung 5-12 auf der Seite 138 dargestellten, Wärmeströme (WS) über 15 verschiedene Zustände (Cases) ermittelt. Die Tabelle 5-3 zeigt diese.

Tabelle 5-3 Darstellung der Fallunterscheidung der Wärmepumpenstrategie nach [212]

Case	$P_{VD_{Kab,neu}}$	$P_{VD_{NT1}}$	$P_{VD_{NT2}}$	P_{PTC}	P_{KDUH}	$P_{KD_{Kab}}$	$P_{t,neu}$
1	$P_{VD_{Kab}}$	0	0	0	$P_t - P_{VD_{Kab}}$	0	P_t
2	$P_{VD_{Kab}}$	0	P_{NT2}	0	$-P_{VD_{Kab}} - P_{NT2} + P_t$	0	P_t
3	$P_{VD_{Kab}}$	0	0	0	$P_t - P_{VD_{Kab}} - P_{Anf}$	P_{Anf}	P_t
4	$P_{VD_{Kab}}$	$P_t - P_{VD_{Kab}} - P_{Anf}$	0	0	0	P_{Anf}	P_t
5	$P_{VD_{Kab}}$	0	P_{NT2}	0	$P_{VD_{Kab}} + P_t - P_{Anf} - P_{NT2}$	P_{Anf}	P_t
6	$P_{VD_{Kab}}$	$P_t - P_{Anf} - P_{VD_{Kab}} - P_{NT2}$	P_{NT2}	0	0	P_{Anf}	P_t
7	0	0	$P_t - P_{Anf}$	0	0	P_{Anf}	P_t
8	0	$P_t - P_{Anf} - P_{NT2}$	P_{NT2}	0	0	P_{Anf}	P_t
9	0	$P_t - P_{Anf}$	0	0	0	P_{Anf}	P_t
10	$P_{VD_{Kab}}$	$P_t - P_{Anf} - P_{VD_{Kab}} - P_{NT2}$	P_{NT2}	0	0	P_{Anf}	P_t
11	0	$P_t - P_{Anf} - P_{NT2}$	P_{NT2}	0	0	P_{Anf}	P_t
12	0	P_{NT1}	P_{NT2}	$\min(P_{Anf} + P_{NT1} + P_t + P_{NT2}, P_{PTC,max})$	0	$-P_{NT1} + P_t - P_{NT2}$	P_t
13	0	0	P_{NT2}	$\min(P_{Anf} + P_{NT2}, P_t, P_{PTC,max})$	0	$P_t - P_{NT2}$	P_t
14	0	P_{NT1}	0	$\min(P_{Anf} + P_{NT1} + P_t, P_{PTC,max})$	0	$-P_{NT1}$	P_t
15	0	0	0	$\min(P_{Anf}, P_{PTC,max})$	0	0	P_t

Mit dem Ziel die, in der Betriebsstrategie definierten, Wärme- und Leistungsflüsse einheitlich zu deklarieren, werden die Leistungs- und die Wärmeströme wie folgt definiert:

$$P_{NT,i} = \begin{cases} 0, \text{keine Heizleistung vorhanden} \\ \in [-P_{NT,i,max}, 0), \text{Heizleistung vorhanden} \end{cases} \forall i \in [1,2] \quad (5-2)$$

$$P_{Anf} = \begin{cases} < 0, \text{Kühlbedarf} \\ \geq 0, \text{Heizbedarf} \end{cases} \quad (5-3)$$

$$P_t \geq 0 \quad (5-4)$$

Über eine erste Bilanzierung der Anforderungsleistung der Fahrgastzelle P_{Anf} , der beiden Potenziale der Niedertemperaturkreisläufe P_{NT1} , P_{NT2} und der Verdichterleistung P_t wird zunächst zwischen einem reinen Heizfall mit einem erforderlichen Einsatz des Luft-PTCs und den Heiz-, den Kühl- bzw. den Reheat-Fällen, welche alleinig durch die Wärmepumpe realisiert werden, differenziert. [212]

Wird festgestellt, dass eine Heizleistung mit einem Luft-PTC-Beitrag benötigt wird (Abbildung 5-13 rechter Pfad), wird in einem ersten Schritt geprüft, ob ein Wärmepotenzial in dem Batteriekreislauf (NT2-Kreislauf) vorhanden und in einem zweiten Schritt wird geprüft, ob eines in dem Elektromotorkreislauf (NT1-Kreislauf) vorhanden ist. Ist beispielsweise bei dem Fahrtantritt, in beiden Niedertemperaturkreisläufen kein Wärmepotenzial vorhanden, wird alleinig der elektrische Niedervolt-Luftzuheizer (NV-PTC) für das Aufwärmen der Fahrgastzelle genutzt. Für diesen Fall ist in der Betriebsstrategie der Case 15 definiert. Ist in dem Batteriekreislauf kein und in dem Elektromotorkreislauf ein Potenzial vorhanden, wird neben dem Luft-PTC der Wärmestrom 3 verwendet, vgl. Case 14. Steht, wie in dem Case 13 dargestellt, nur in dem Batteriekreislauf Wärme zu der Verfügung, wird der Wärmestrom 4 zusätzlich zu dem NV-PTC genutzt. Ist in beiden Niedertemperaturkreisläufen überschüssige Wärme vorhanden, werden die beiden Wärmeströme 3 und 4 und zusätzlich der NV-PTC verwendet. Dieser Fall wird in dem Case 12 umgesetzt. [212]

Ist anstatt eines Heizfalls mit einem PTC-Einsatz eine Heiz-, eine Kühl- oder eine Reheat-Leistung ohne einem PTC-Einsatz gefordert (Abbildung 5-13 linker Pfad), wird geprüft, ob die Summe aus P_{Anf} , P_{NT1} und $P_t > 0$ ist. Ist dies zutreffend, wird anhand des Zustandskriteriums „Reheat“ weiter differenziert. Liegt dieser, wie in dem Case 10, vor, werden die Wärmeströme 2, 3 und 4 realisiert. Ist dies nicht der Fall, werden nur die Wärmeströme 3 und 4 genutzt und die Kabine damit aufgewärmt, vgl. Case 11. Ergibt die Prüfung der Summe aus P_{Anf} , P_{NT1} und P_t einen Wert < 0 , wird anschließend evaluiert, ob die Anforderungsleistung ≥ 0 oder < 0 ist. Somit wird überprüft, ob die Kabine aufgewärmt oder gekühlt werden muss. Ist Letzteres der Fall, wird anschließend über einen Abgleich der aktuellen zu der maximalen Batterietemperatur differenziert, ob sowohl die Kabine als auch das Batteriesystem gekühlt werden muss. Überschreitet die Batterietemperatur dabei ihre Solltemperatur, ist die Betriebsstrategie in dem Case 2 und die beiden Wärmeströme 1 und 5 werden umgesetzt. Die Kabine und der Batteriekreislauf werden somit aktiv gekühlt. Liegt die Batterietemperatur unterhalb des Grenzwerts, wird lediglich die Kabine über den Wärmestrom 1 temperiert, vgl. dazu Case 1. Ergibt die Anforderungsleistung der Kabine einen Heizfall, so wird folgend geprüft, ob ein Reheat vorliegt. Ist dies zutreffend, wird, wie in der Spalte „I“ gezeigt, zunächst die Batterietemperatur mit dessen Maximum verglichen und anschließend überprüft, ob die Summe aus Kabinenverdampfer- und aus Verdichterleistung ausreichend ist, um den Wärmebedarf der Fahrgastzelle zu decken. Liegt die Batterietemperatur unterhalb deren Grenzwert und reicht der Kondensationswärmestrom der Kabine aus, wird lediglich der Wärmestrom 2 in dem Case 3 realisiert. Ist die Wärmemenge bei dem Kondensieren nicht ausreichend (Case 4), wird zusätzlich Wärme aus dem Elektromotorkreislauf über den Wärmestrom 3 entnommen, um die Kabine aufzuwärmen. Erreicht oder überschreitet die Batterietemperatur das thermische Limit, wird, äquivalent zu den Cases 3 und 4, unterschieden, ob die Kabinenverdampfer- und die Verdichterleistung ausreichend ist, um den Kabinenheizbedarf zu decken. In den so definierten Cases 5 und 6 wird zusätzlich zu den aktiven Wärmeströmen in den Cases 3 und 4 immer der Verdampfer des Batteriekreislaufs aktiviert und der Wärmestrom 4 und ggf. 5 realisiert. Damit ist sichergestellt, dass die Batterie gekühlt wird. Ergibt die Prüfung des Reheats, dass ein reiner Heizfall vorliegt, können die Cases 7, 8 und 9 eintreten. Ist die Batterietemperatur über deren Grenzwert, liegt der Case 8 vor und die Wärmeströme 3, 4 und 5 werden aktiviert. Die Batterie wird somit gekühlt, während gleichzeitig die Kabine aufgewärmt wird. Ist die Batterietemperatur noch innerhalb ihres Sollbereichs, wird überprüft, ob Wärme aus dem Batteriekühlkreislauf entnommen werden kann. Ist dies der Fall, wird Case 7 angewandt und der Wärmestrom 4 realisiert. Ist dies nichtzutreffend, wird das Potenzial des Elektromotorkreislaufs genutzt und die Fahrgastzelle mit dem Wärmestrom 3 temperiert, vgl. Case 9. [212]

5.2 Brennstoffzellenfahrzeuge

Wie bereits in dem vorhergehenden Kapitel beschrieben, erfolgt der Aufbau der xEV-Modelle modular. Die Abbildung 5-14 stellt diesen für die Fahrzeugvarianten mit einem Brennstoffzellensystem (BZS) vereinfacht dar. Eine allgemeine Erklärung der einzelnen Submodelle erfolgt bei einem gleichen Aufbau einmalig, stellvertretend für diverse Varianten. Unterschiede werden erwähnt und diskutiert.

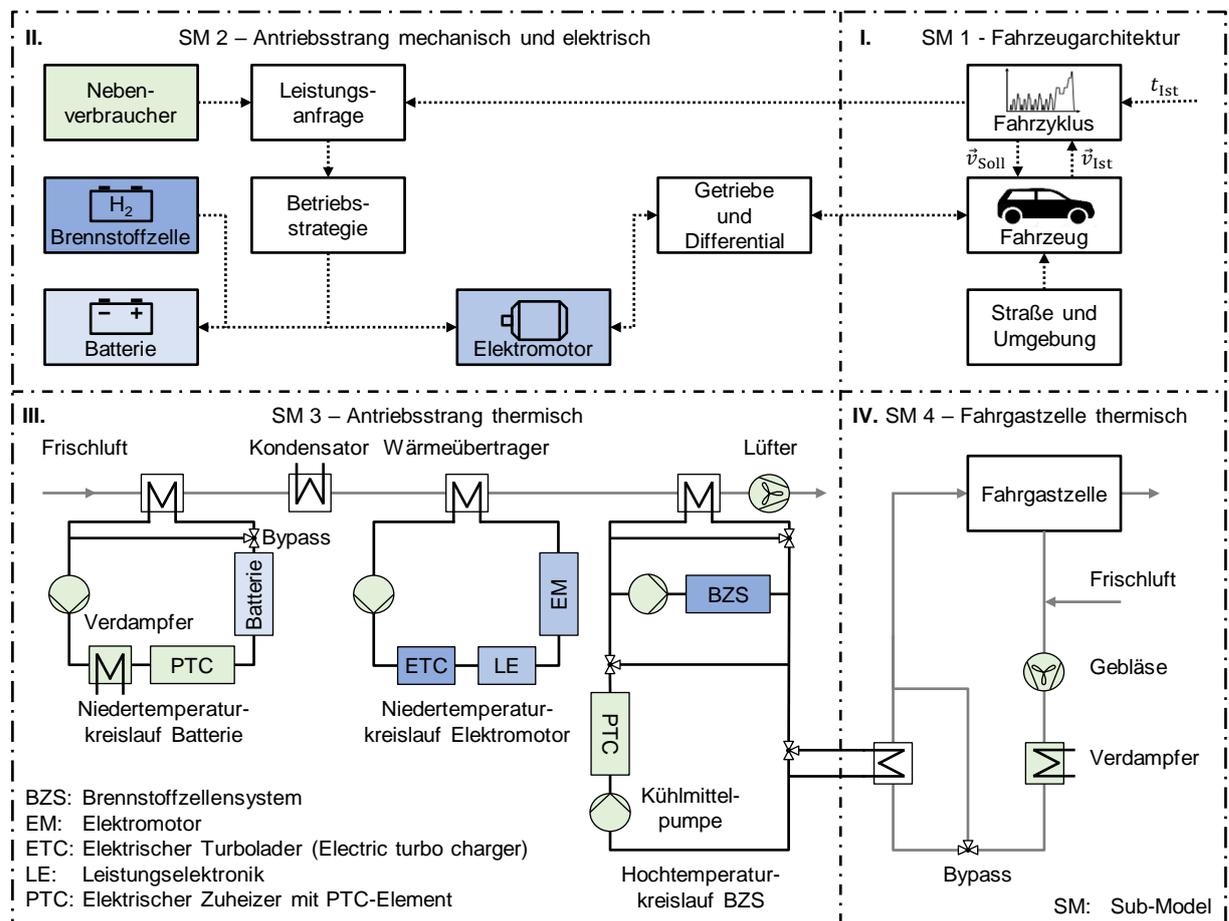


Abbildung 5-14 Schematischer Aufbau der Antriebsstrangvarianten mit einem BZS nach [115]

5.2.1 Brennstoffzellen-Range-Extender-Fahrzeug

Der Antriebsstrang des Brennstoffzellen-Range-Extender-Fahrzeugs, folgend FC-REEV genannt, beinhaltet die geringsten Anpassungen gegenüber einem Batteriefahrzeug. Prinzipiell wird der Antriebsstrang des batterieelektrischen Fahrzeugs um ein Brennstoffzellenmodul, mit dem Ziel die ohne ein Nachladen realisierbare Fahrstrecke zu erhöhen, erweitert. Aufgrund der höchsten Ähnlichkeit wird dieser Antriebsstrangaufbau als erste Variante der Brennstoffzellenfahrzeuge beschrieben.

Submodell 1 – Fahrzeugarchitektur:

Die Fahrzeugarchitektur der Brennstoffzellenfahrzeuge ist analog der in der Abbildung 5-2 auf der Seite 127 gezeigten Modellierung aufgebaut. Die Tabelle 5-4 stellt die Parametrierung der FC-REEVs dar. Die Variante des ersten Segments wird von einem Elektromotor mit einer maximalen Leistung von 68,3 kW angetrieben. Das dabei verbaute BZS liefert maximal 27,1 kW. Mit einem Wasserstofftankinhalt von 2,0 kgH₂ werden mindestens 294 km zurückgelegt. Das Batteriesystem, als Hauptantrieb, besitzt eine nutzbare Kapazität von 7,4 kWh. Rein batterieelektrisch wird damit eine Strecke von mindestens 56 km gefahren. Insgesamt ergibt sich nach der EWG-Richtlinie 92/21 [103] für das Fahrzeug der Klein- und Kleinwagenklasse einer Gesamtmasse von 1 243,8 kg inkl. Fahrer und Gepäck. Aufgrund

gesteigerter Fahranforderungen erhöht sich die Summe der Massen des FC-REEVs der Mittelklasse um ca. 380 kg gegenüber dem Derivat des ersten Segments. Ein Elektromotor mit einer maximalen Leistung von 96,3 kW wird verbaut, um die geforderten Höchstgeschwindigkeiten und Beschleunigungen zu erzielen. Dieser wird hauptsächlich durch ein Batteriesystem mit einem nutzbaren Energieinhalt von 14,9 kWh gespeist. Sollte der Range-Extender benötigt werden, liefert ein Brennstoffzellenmodul maximal 37,5 kW. Ein Wasserstofftanksystem mit einer Speicherkapazität von 3,2 kgH₂ soll eine zusätzliche Reichweite von 400 km ermöglichen. Das FC-REEV der Oberklasse ist in dem Vergleich zu der Mittelklassevariante noch leistungsstärker. Die Fahrzeugvariante des dritten Segments besitzt einen Elektromotor mit einer Leistung von maximal 190,6 kW, ein Batteriesystem mit einer nutzbaren Batteriekapazität von 32,5 kWh und ein BZS welches maximal 47,5 kW bereitstellt. Rein batterieelektrisch legt das FC-REEV des dritten Segments mindestens 188 km in dem Zertifizierungszyklus zurück. Über das verbaute Range-Extender-Modul mit einer Wasserstoffspeichermenge von 4,0 kgH₂ sollen zusätzlich 412 km möglich sein. Insgesamt wiegt das Fahrzeug der Oberklasse 2 101,8 kg nach der EWG-Richtlinie 92/21 [103].

Tabelle 5-4 Übersicht über die Parametrierung FC-REEV und FC-PHEV Segmentfahrzeuge 2015

Parameter	FC-REEV 2015			FC-PHEV 2015			Einheit
	Seg-1	Seg-2	Seg-3	Seg-1	Seg-2	Seg-3	
Höchstgeschwindigkeit batterieelektrisch	132,5	140,0	180,0	120,0	130,0	140,0	km/h
Höchstgeschwindigkeit BZS / VM	120,0	130,0	140,0	150,0	180,0	210,0	km/h
Beschleunigungszeit 0 km/h - 100 km/h	12,6	10,5	7,2	12,6	10,5	7,2	s
Beschleunigungszeit 80 km/h - 120 km/h	10,1	8,7	4,9	10,1	8,7	4,9	s
Reichweite batterieelektrisch	56,0	100,0	188,0	35,0	50,0	81,0	km
Reichweite BZS / VM	294,0	400,0	412,0	315,0	450,0	519,0	km
Leistung Verbrennungsmotor (VM)	-	-	-	-	-	-	kW
Leistung Elektromotor	68,3	96,3	190,6	75,4	139,1	215,8	kW
Leistung Brennstoffzellensystem (BZS)	27,1	37,5	47,5	50,3	92,8	144,0	kW
Kapazität Batteriesystem	7,4	14,9	32,5	5,1	8,6	16,1	kWh
Masse Verbrennungsmotor	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Elektromotor	53,4	64,2	91,6	56,8	77,7	97,4	kg
Masse Brennstoffzellensystem	98,6	111,3	123,7	126,4	177,2	238,5	kg
Masse Batteriesystem	73,2	128,9	287,5	69,5	107,2	206,1	kg
Masse Getriebe	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	kg
Masse Tanksystem	42,0	69,3	86,2	45,8	80,4	111,4	kg
Masse Tankinhalt	2,0	3,2	4,0	2,1	3,7	5,2	kg
Masse Abgassystem	-	-	-	-	-	-	kg
Masse verstärkter Unterboden	*	*	*	*	*	*	kg
Masse zusätzliche Kühlkreisläufe	27,6	31,6	40,4	29,8	37,5	47,6	kg
Masse elektrische Zusatzkomponenten	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	40,1	kg
Masse Karosserie	822,0	1 093,7	1 343,4	822,0	1 093,7	1 343,4	kg
Gesamtgewicht	1 168,8	1 552,3	2 026,8	1 202,4	1 627,6	2 099,6	kg
Gesamtgewicht nach EG	1 243,8	1 627,3	2 101,8	1 277,4	1 702,6	2 174,6	kg

* im Batteriesystem enthalten

Submodell 2 – Antriebsstrang mechanisch und elektrisch:

Der elektrische und mechanische Aufbau des FC-REEVs ist ein, um ein Brennstoffzellenmodul erweiterter Batterieantriebsstrang, mit dem Ziel bei Bedarf die Reichweite zu verlängern. Prinzipiell kann ein FC-REEV somit ähnlich einem Batteriefahrzeug betrieben werden. Je nach Betriebsstrategie wird der Brennstoffzellen-Range-Extender beispielsweise nur bei einem geringen SOC verwendet. In dem Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine leicht modifizierte Betriebsstrategie nach [214] für die Fahrzeugvarianten FC-REEV, FC-PHEV und FCEV angewandt. Die Tabelle 5-5 fasst diese für den Fall „Charge

Depleting⁴⁷ (CD) und die Tabelle 5-6 für das „Charge Sustaining“⁴⁸ (CS) zusammen. Die beiden Betriebsstrategien werden folgend allgemeingültig und anschließend spezifisch für einen FC-REEV erklärt. Die dabei verwendete aktuelle Leistungsanforderung (LA) setzt sich aus der LA für die Bewegung des Fahrzeugs und der LA resultierend aus den aktuellen Nebenverbrauchern zusammen.

Tabelle 5-5 Betriebsstrategie FCxEV Leistungsanfrage BZS Charge Depleting nach [214]

SOC_{Ist} \ P_{LA}	$P_{LA} \leq -P_{Batterie,Min} + P_{BZS, Opt}$	$-P_{Batterie,min} < P_{LA} \leq P_{BZS,Opt}$	$P_{BZS,Opt} < P_{LA} < P_{Batterie, Max}$	$P_{LA} \geq P_{Batterie, Max}$
$SOC_{Ist} < SOC_{Min}$	0	$P_{BZS,Opt}$	P_{LA}	P_{LA}
$SOC_{Ist} \geq SOC_{Min}$	0	0	0	$Max(P_{BZ,Opt}, P_{LA} - P_{Batterie,Max})$

LA: Lastanforderung BZS: Brennstoffzellensystem Opt: Optimal Max: Maximum Min: Minimum

In dem CD-Modus, ist eine Nutzung des Batteriesystems priorisiert. Dieses wird während der Fahrt, wie die Bezeichnung impliziert, entladen. Dabei wird so lange rein batterieelektrisch gefahren, bis der Ladezustand einen Grenzwert, hier SOC_{Min} genannt, unterschreitet oder die maximal mögliche Batterieleistung $P_{Batterie,max}$ geringer als die aktuelle LA P_{LA} ist. Wird die maximale Batterieleistung überschritten, liefert das BZS das Maximum aus der optimalen Leistung des Brennstoffzellensystems $P_{BZS,Opt}$ und der LA abzüglich der maximalen Batterieleistung. Wird während oder bei dem Start der Fahrt der definierte Minimalwert des Ladezustands des Batteriesystems unterschritten und liegt die LA zwischen der Summe der maximal negativen Batterieleistung $P_{Batterie,min}$ addiert der optimalen Leistung des Brennstoffzellensystems und der optimalen Leistung des Brennstoffzellensystems, wird die optimale Leistung des Brennstoffzellensystems bereitgestellt, um den Ladezustand zu steigern. Erhöht sich die LA über die optimale Leistung des Brennstoffzellensystems hinaus, stellt das BZS die Anfrage gesamtheitlich bereit. Wird der Grenzwert SOC_{Min} einmalig unterschritten, wird in den CS-Modus gewechselt.

Tabelle 5-6 Betriebsstrategie FCxEV Leistungsanfrage BZS Charge Sustaining nach [214]

SOC_{Ist} \ P_{LA}	$P_{LA} \leq -P_{Batterie,Min} + P_{BZS, Opt}$	$-P_{Batterie,min} < P_{LA} \leq P_{BZS,Opt}$	$P_{BZS,Opt} < P_{LA} < P_{Batterie, Max}$	$P_{LA} \geq P_{Batterie, Max}$
$SOC_{Ist} < SOC_{Min}$	0	$P_{BZS,Opt}$	P_{LA}	P_{LA}
$SOC_{Ist} \geq SOC_{Min}$	0	0	$P_{BZS,Opt}$	$Max(P_{BZ,Opt}, P_{LA} - P_{Batterie,Max})$

LA: Lastanforderung BZS: Brennstoffzellensystem Opt: Optimal Max: Maximum Min: Minimum

Ist der CS-Betrieb aktiv, wird versucht einen bestimmten Ladezustand der Batterie zu halten. Folglich wird in dem Fall einer Fahrzeugvariante mit einem BZS dieses mehr beansprucht. Liegt der SOC über dem Grenzwert und ist die aktuelle LA größer als die optimale Leistung des BZSs wird mindestens diese oder, falls größer, die Differenz der LA minus der maximalen Batterieleistung bereitgestellt. Ist der Ladezustand niedriger als der Grenzwert, wird analog der CD-Betriebsstrategie verfahren.

Speziell für einen FC-REEV geltend, wird ab einer Geschwindigkeit von 120 km/h und einem um 10 % erhöhten SOC-Grenzwerts eine, um die aktuelle Nebenverbraucherleistung, erhöhte, optimale Leistung des BZSs anstatt dieser zu der Verfügung gestellt. Diese Anpassung der Betriebsstrategie dient dazu, den Ladezustand auch unter temporär erhöhten Lasten, wie beispielsweise während einer Autobahnfahrt, zu halten.

⁴⁷ Charge depleting: Engl. Begriff. Z. Dt. Ladezustand reduzieren.

⁴⁸ Charge sustaining: Engl. Begriff. Z. Dt. Ladezustand erhalten.

Neben den beschriebenen Betriebsmodi ist eine Auswahl einer vordefinierten, reinen Batterie- oder Brennstoffzellenfahrt möglich. Zudem kann mittels einer Kaltstartschonung einer der beiden Energielieferanten aktiviert werden, indem bis zu einer parametrierbaren Komponententemperatur die jeweilig inaktive keine Leistung liefern soll. In dem Rahmen der vorliegenden Betrachtung wird dies nicht berücksichtigt und somit keine Kaltstartschonung angewandt. Es wird zudem davon ausgegangen, dass die PHEV- und die REEV-Varianten mit einer nahezu vollen Batterie starten und zunächst immer der CD-Modus aktiv ist. Bei dem FCEV wird, aufgrund eines nicht von außen aufladbaren Batteriesystems, ein mittlerer Ladezustand angenommen und ab dem Start in dem CS-Betrieb gefahren.

Submodell 3 – Antriebsstrang thermisch:

Das Thermomanagement des Antriebsstrangs der Brennstoffzellenfahrzeuge besteht aus zwei Niedertemperaturkreisläufen, Batterie- und Elektromotorkreislauf, und einem Hochtemperaturkreislauf, BZS-Kreislauf. Der prinzipielle Aufbau und die Regelung der Niedertemperaturkreisläufe erfolgen nahezu analog jenem des Batteriefahrzeugs 2015. In dem Kühlkreislauf des Elektromotors ist lediglich der elektrische Luftverdichter und in den Batteriekreislauf der FCC zusätzlich verbaut. Die Anbindungsflächen und Kühlergrößen werden den Komponenteneigenschaften angepasst und über deren Verlustleistung skaliert. Der Hochtemperaturkreislauf der Brennstoffzelle erweitert den Wasser-Glykol-Kreislauf für das Aufwärmen der Fahrgastzelle des Batteriefahrzeugs 2015. Die Brennstoffzellensystemkomponenten Brennstoffzellenstack und Ladeluftkühler werden zu diesem parallel geschaltet, mit einer eigenen Kühlmittelpumpe betrieben und um einen Hochtemperaturkühler und dessen Bypass erweitert. Ist das BZS bei Fahrtbeginn noch nicht auf Betriebstemperatur, wird der Wärmeübertrager umgangen, um ein rasches Aufwärmen des Brennstoffzellenstacks zu ermöglichen. Ist dessen anfängliche Temperatur dabei unterhalb von 5 °C unterstützt ein elektrischer Wasserheizer zusätzlich das Aufheizen, bis diese Temperaturschwelle erreicht ist, um ein mögliches Gefrieren des Wasserdampfs zu verhindern. Der elektrische Heizer wird in einem Heizfall der Kabine zudem so lange betrieben, bis die Austrittstemperatur des Brennstoffzellenstacks 60 °C übersteigt und diese anschließend für die Kabinenaufheizung zur Verfügung steht. Dabei ist eine Temperaturhysterese von 5 K implementiert, welche ein hochfrequentes Ein- und Ausschaltverhalten verhindert. Während des regulären Aufheizvorgangs wird der Wasserheizkreislauf somit wie bei dem Batteriefahrzeug 2015 beschrieben, betrieben.

Submodell 4 – Fahrgastzelle thermisch

Das Thermomanagement der Fahrgastzelle stellt ein Teilmodul der Gesamtfahrzeugsimulation dar. Bei der Betrachtung für 2015 wird dieses für die xEVs identisch verwendet. Der detaillierte Aufbau und die Erklärung der Funktionen sind in dem Kapitel 5.1.1 ab der Seite 130 beschrieben.

5.2.2 Brennstoffzellen-Plug-In-Fahrzeug

Bei dem Übergang einer Range-Extender- zu einer Plug-In-Brennstoffzellenvariante wird, vereinfacht beschrieben, der Zelltyp des Batteriesystems verändert, dieses verkleinert und das Brennstoffzellensystem vergrößert. Anstelle des Batteriesystems bei dem FC-REEV bildet das BZS dabei die Hauptantriebskomponente des FC-PHEVs.

Submodell 1 – Fahrzeugarchitektur:

Wird das Antriebskonzept nach den in dem Kapitel 3.1.2 beschriebenen Kriterien ausgelegt und die Komponenten- und die Fahrzeugeigenschaften aus den Abschnitten 3.2 und 3.3 verwendet, ergeben sich für die unterschiedlichen Fahrzeuggrößen die in der Tabelle 5-4 auf der Seite 144 zu sehenden Fahrzeugeigenschaften.

Das Brennstoffzellen-Plug-In-Fahrzeug des ersten Segments ist mit einem Brennstoffzellensystem mit einer maximalen Leistung von 50,3 kW und einer elektrischen Antriebseinheit mit einer maximalen Leistung von 75,4 kW ausgestattet. Über die maximale Leistung des BZSs wird eine dauerhafte Höchstgeschwindigkeit in dem reinen Brennstoffzellenbetrieb von 150 km/h erreicht. Rein batterieelektrisch wird über ein Batteriesystem mit einem Energieinhalt von 5,1 kWh eine maximale Geschwindigkeit von

120 km/h und eine Reichweite in dem Zertifizierungszyklus von mindestens 35 km realisiert. Zusätzlich ist durch einen Wasserstofftank mit einem Tankinhalt von 2,1 kgH₂ eine Reichweite von mindestens 315 km in dem Brennstoffzellenbetrieb fahrbar. Die Gesamtmasse nach EWG-Richtlinie 92/21 [103] beläuft sich für den Brennstoffzellen-Plug-In des kleinen Fahrzeugsegments auf 1 277,4 kg. Mit einer Erhöhung um knapp 430 kg ergibt sich eine Gesamtmasse von 1 702,6 kg für den FC-PHEV des zweiten Segments. Ein Elektromotor mit einer maximalen Leistung von 139,1 kW ist verbaut, um sowohl die geforderten Höchstgeschwindigkeiten von 180 km/h in dem Brennstoffzellenbetrieb und von 130 km/h in dem Batteriebetrieb, die Beschleunigungszeiten als auch die Zyklenanforderungen zu erreichen. Der Elektromotor wird entweder von einem oder von beiden Energiewandlern versorgt. Das verbaute Brennstoffzellensystem hat dabei eine maximale Leistung von 92,8 kW und einen Wasserstofftankinhalt von 3,7 kgH₂. Das installierte Batteriesystem verfügt über eine Batteriekapazität von 8,6 kWh. Aus den so definierten Komponenteneigenschaften ergibt sich eine reine batterieelektrische Reichweite von mindestens 50 km und eine brennstoffzellenelektrisch fahrbare Distanz von mindestens 450 km. Die Anforderung an die mögliche Wegstrecke des FC-PHEVs der Segmentklasse mittel wird in der dritten Segmentvariante groß um 100 km erhöht. Die sich daraus und aus den Fahranforderungen ergebende Gesamtmasse des FC-PHEVs der Oberklasse beläuft sich nach der EWG-Richtlinie 92/21 [103] auf 2 174,6 kg. Angetrieben wird das Fahrzeug dieser Fahrzeugklasse von einem 215,8 kW starken Elektromotor. Dieser wird von einem Brennstoffzellensystem mit 144,0 kW und einem Batteriesystem mit 16,1 kWh versorgt. Über ein Wasserstofftanksystem mit einem Tankinhalt von 5,2 kgH₂ wird eine Reichweite von mindestens 519 km in dem Brennstoffzellenbetrieb gefahren. Rein batterieelektrisch sollen mindestens die geforderten 81 km an einem Stück fahrbar und eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h möglich sein. Wird das Fahrzeug alleinig aus dem Brennstoffzellensystem betrieben, werden 210 km/h als Maximalgeschwindigkeit erreicht.

Submodell 2 – Antriebsstrang mechanisch und elektrisch:

Der elektrische und der mechanische Aufbau der Brennstoffzellenvarianten ist schematisch identisch zu jenem bereits beschriebenen des FC-REEVs, vgl. Abbildung 5-14 auf der Seite 143. Die in den Brennstoffzellenvarianten verbauten Komponenten werden antriebsstrangspezifisch abgeändert und angepasst. Das Brennstoffzellensystem und der Elektromotor werden dabei auf die jeweiligen Maximalleistungen skaliert. Das Batteriesystem wird, wie in dem Kapitel 4.1 beschrieben, basierend auf einer PHEV-Zelle bedarfsgerecht aufgebaut. Je nach anfänglichem Ladezustand wird die Betriebsstrategie gewählt. Ist der initiale SOC ausreichend hoch, wird zunächst in dem CD-Modus gefahren. Unterschreitet der Batterieladezustand den definierten Grenzwert, wird in den CS-Betrieb gewechselt.

Submodell 3 – Antriebsstrang thermisch:

Das Thermomanagement des Brennstoffzellen-Plug-In-Antriebsstrangs ist ebenfalls schematisch identisch zu jenem des FC-REEVs aufgebaut, vgl. dazu Abbildung 5-14 auf der Seite 143. Die Kühlergrößen, die Anbindungsflächen und die physikalischen Eigenschaften der Komponenten werden anhand der Fahrzeugauslegung angepasst und entsprechend modelliert.

Submodell 4 – Fahrgastzelle thermisch:

Das Thermomanagement der Fahrgastzelle stellt ein Teilmodul der Gesamtfahrzeugsimulation dar. Bei der Betrachtung für das Jahr 2015 wird dieses für die analysierten xEVs identisch verwendet. Der detaillierte Aufbau und die Erklärung der Funktionen sind in dem Kapitel 5.1.1 dokumentiert.

5.2.3 Brennstoffzellenfahrzeug 2015 und 2025

Das Brennstoffzellenfahrzeug, FCEV, besitzt in dem Vergleich zu den Plug-In- und zu den REEV-Varianten ein Batteriesystem mit einem geringen Energieinhalt und einer höheren, möglichen Entladerate. In dem Wesentlichen wird das Batteriesystem bei einem reinen Brennstoffzellenfahrzeug für die Rekuperation, für das Boosten, für die Glättung der Leistungsanforderung und für die Unterstützung bei einem Startvorgang eingesetzt. Aufgrund einer daraus resultierenden, hohen Leistungsfähigkeit wird die Zellchemie primär auf Leistung und nicht auf einen möglichst hohen Energieinhalt ausgelegt. In den

reinen Brennstoffzellenantrieben wird deshalb ein Batteriesystem basierend auf einer HEV-Zelle verwendet.

Submodell 1 – Fahrzeugarchitektur:

Das Submodell Fahrzeugarchitektur ist bei allen Antriebsvarianten identisch aufgebaut. Die Abbildung 5-2 auf der Seite 127 stellt dieses dar. In dem Wesentlichen besteht das Submodell aus den Fahrzeugeigenschaften, der Straßenanbindung, den Umgebungsbedingungen, dem Differenzialgetriebe und der Vorgabe und der Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Parametrierung des Modells hinsichtlich der Fahrzeugeigenschaften erfolgt, wie in dem Kapitel 3.1.2 erläutert. Dabei werden die Stirnfläche, der c_w -Wert und der Rollwiderstand für das jeweilige Betrachtungsjahr für die verschiedenen Antriebsformen einheitlich angewandt und die Fahrzeugmasse antriebspezifisch und iterativ über definierte Prämissen berechnet, vgl. dazu Kapitel 3.1.2 und Kapitel 3.2 bis Kapitel 3.4.

Durch eine über die Prämissen bestimmte Auslegung erreicht das Brennstoffzellenfahrzeug des ersten Segments in dem **Betrachtungsjahr 2015**, mit einem Elektromotor mit einer Spitzenleistung von 75,2 kW und einem Brennstoffzellensystem mit einer maximalen Leistung von 50,1 kW, eine Höchstgeschwindigkeit von 150 km/h. Das FCEV beschleunigt dabei in 12,6 s von 0 km/h auf 100 km/h und in 10,1 s von 80 km/h auf 120 km/h. Eine Reichweite von mindestens 350 km wird mit einem Tankinhalt von 2,3 kgH₂ bei einer Fahrzeugmasse nach der EWG-Richtlinie 92/21 [103] von 1 252,5 kg erreicht, vgl. Tabelle 5-7 auf der Seite 149 links. Mit dieser Fahrzeugmasse ist die Brennstoffzellenvariante der Fahrzeugklasse Klein- und Kleinwagen um ca. 400 kg leichter als die Variante der Mittelklasse. Diese erzielt, mit einem Elektromotor mit einer Leistung von maximal 138,5 kW, einer Brennstoffzellensystemleistung von maximal 92,4 kW und einem Batteriesystem mit einem Energieinhalt von 1,4 kWh, eine maximale Geschwindigkeit von 180 km/h, eine Zeitdauer von 10,5 s für eine Beschleunigung von 0 km/h auf 100 km/h und eine Zeitspanne von 8,7 s für eine Beschleunigung von 80 km/h auf 120 km/h. Mit einem Wasserstofftankinhalt von 4,1 kgH₂ ermöglicht das Brennstoffzellenfahrzeug der Mittelklasse eine Reichweite in dem Zertifizierungszyklus von mindestens 500 km. Diese fahrbare Distanz in dem Brennstoffzellenbetrieb wird in dem Betrachtungsjahr 2015 lediglich von dem FCEV der dritten Fahrzeugklasse übertroffen. Dieses absolviert mit einem Tankinhalt von 5,7 kgH₂ eine mögliche Fahrstrecke von mindestens 600 km in dem NEFZ und ist nach der EWG-Richtlinie 92/21 [103] 2 029,4 kg schwer. Trotz einer hohen Fahrzeugmasse wird mit einem Elektromotor mit einer maximalen Leistung von 213,9 kW, einem Brennstoffzellensystem mit einer maximalen Leistung von 142,7 kW und einem HEV-Batteriesystem mit einem Energieinhalt von 1,6 kWh eine maximale Höchstgeschwindigkeit von 210 km/h, eine Beschleunigungszeit von 7,2 s von 0 km/h auf 100 km/h und eine Zeitdauer von 4,9 s von 80 km/h auf 120 km/h erzielt.

Für die Auslegung der Brennstoffzellenvariante in dem **Prognosejahr 2025** werden die in dem Abschnitt 3.2 und in dem Abschnitt 3.3 prognostizierten Fahrwiderstands- und Komponenteneigenschaften und die in dem Kapitel 3.4 ermittelten Höchstgeschwindigkeiten und Beschleunigungszeiten in dem iterativen Auslegungstool berücksichtigt. Aus diesem werden für die verschiedenen Fahrzeuggrößen für das Jahr 2025 die, in der Tabelle 5-7 auf der Seite 149 rechts dargestellten, Fahrzeugeigenschaften ermittelt. Die Brennstoffzellenvariante des ersten Segments erzielt, mit einer Leistung des Elektromotors von 70,8 kW, einem Brennstoffzellensystem mit 47,2 kW und einer Batteriekapazität von 1,3 kWh, eine Höchstgeschwindigkeit von 150 km/h, eine Beschleunigungszeit von 12,3 s von 0 km/h auf 100 km und 9,9 s von 80 km/h auf 120 km/h. Zudem ist das Fahrzeug der Klein- und Kleinwagenklasse mit einem Wasserstofftanksystem mit einem Tankinhalt von 3,3 kgH₂ ausgestattet und erreicht in dem WLTC eine Reichweite von mindestens 450 km. Mit den neuen Fahrzeugmassen, dem Wegfall des verstärkten Unterbodens (-28,2 kg) und einer reduzierten Karosseriemasse (-30 kg) ergibt sich für die Fahrzeugmasse nach der EWG-Richtlinie 92/21 [103] eine Masse von 1 177,6 kg und somit eine Einsparung gegenüber dem Betrachtungsjahr 2015 von ca. 75 kg. Das Fahrzeug der Mittelklasse wiegt etwa 310 kg mehr als jenes der Fahrzeugklasse Klein- und Kleinwagen, ist aber in dem Vergleich zu der Ausführung des Betrachtungsjahrs 2015 ca. 165 kg leichter. Die festgestellte Masseneinsparung resultiert aus einer angenommenen Reduzierung der Karosseriemasse (-80 kg), aus einem nicht mehr verbauten Unterboden

(-32,5 kg), aus einer Weiterentwicklung der Komponenten, aus einer damit verbundenen gestiegenen Leistungsdichte und aus reduzierten Fahrwiderständen. Mit einer Elektromotorleistung von maximal 133,1 kW, einer Brennstoffzellensystemleistung von 88,8 kW und einer Batteriekapazität von 1,5 kWh erreicht das Brennstoffzellenfahrzeug der Mittelklasse eine Höchstgeschwindigkeit von 180 km/h, eine Beschleunigungszeit von 0 km/h auf 100 km/h von 10,1 s und eine Zeitdauer von 8,6 s für die Elastizität von 80 km/h auf 120 km/h. Mit einem Wasserstofftankinhalt von 4,3 kgH₂ wird in dem WLTC eine Reichweite von mindestens 500 km zurückgelegt. Diese Reichweite wird, wie bereits für das Betrachtungsjahr 2015, auch in dem Prognosejahr 2025 von dem Brennstoffzellenfahrzeug der dritten Segmentklasse übertroffen. Dieses erzielt mit einem Tankinhalt von 5,5 kgH₂ eine Reichweite von mindestens 600 km. Mit einer maximalen Leistung von 189,5 kW des Elektromotors und 126,4 kW des Brennstoffzellensystems und einer Batteriekapazität von 1,7 kWh werden eine Höchstgeschwindigkeit von 210 km/h, eine Beschleunigung von 0 km/h auf 100 km/h in 7,0 s und eine Elastizität von 80 km/h auf 120 km/h in 4,5 s realisiert. Das Fahrzeug der Oberklasse wiegt nach der EWG-Richtlinie 92/21 1 745,0 kg und ist in dem Prognosejahr 2025 somit ca. 285 kg leichter als in dem Betrachtungsjahr 2015. Die über den Betrachtungszeitraum von zehn Jahren realisierte Massenreduzierung resultiert aus einer Verringerung der Karosseriemasse (-150 kg), aus dem Wegfall eines verstärkten Unterbodens (-35,5 kg), aus einer Steigerung der spezifischen Gewichtsichten der Komponenten und aus der Entwicklung der Reduktion der Fahrwiderstände.

Tabelle 5-7 Übersicht über die Parametrierung der FCEV 2015 und FCEV 2025 Segmentfahrzeuge

Parameter	FCEV 2015			FCEV 2025			Einheit
	Seg-1	Seg-2	Seg-3	Seg-1	Seg-2	Seg-3	
Höchstgeschwindigkeit batterieelektrisch	-	-	-	-	-	-	km/h
Höchstgeschwindigkeit BZS / VM	150,0	180,0	210,0	150,0	180,0	210,0	km/h
Beschleunigungszeit 0 km/h - 100 km/h	12,6	10,5	7,2	12,3	10,1	7,0	s
Beschleunigungszeit 80 km/h - 120 km/h	10,1	8,7	4,9	9,9	8,6	4,5	s
Reichweite batterieelektrisch	-	-	-	-	-	-	km
Reichweite BZS / VM	350,0	500,0	600,0	450,0	500,0	600,0	km
Leistung Verbrennungsmotor (VM)	-	-	-	-	-	-	kW
Leistung Elektromotor	75,2	138,5	213,9	70,8	133,1	189,5	kW
Leistung Brennstoffzellensystem (BZS)	50,1	92,4	142,7	47,2	88,8	126,4	kW
Kapazität Batteriesystem	1,2	1,4	1,6	1,3	1,5	1,7	kWh
Masse Verbrennungsmotor	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Elektromotor	56,7	77,5	96,9	48,3	66,8	80,0	kg
Masse Brennstoffzellensystem	126,2	176,7	236,9	109,4	147,5	182,0	kg
Masse Batteriesystem	33,0	37,2	39,7	29,7	33,0	35,5	kg
Masse Getriebe	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	kg
Masse Tanksystem	50,2	87,4	122,3	61,5	80,3	102,2	kg
Masse Tankinhalt	2,3	4,1	5,7	3,3	4,3	5,5	kg
Masse Abgassystem	-	-	-	-	-	-	kg
Masse verstärkter Unterboden	28,2	32,5	35,5	-	-	-	kg
Masse zusätzliche Kühlkreisläufe	28,8	35,8	44,0	28,4	35,2	41,4	kg
Masse elektrische Zusatzkomponenten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	kg
Masse Karosserie	822,0	1 093,7	1 343,4	792,0	1 013,7	1 193,4	kg
Gesamtgewicht	1 177,5	1 574,9	1 954,4	1 102,6	1 410,9	1 670,0	kg
Gesamtgewicht nach EG	1 252,5	1 649,9	2 029,4	1 177,6	1 485,9	1 745,0	kg

Submodell 2 – Antriebsstrang mechanisch und elektrisch:

Der elektrische und mechanische Aufbau der Brennstoffzellenvarianten ist schematisch identisch aufgebaut, vgl. Abbildung 5-14 auf der Seite 143. Die verbauten Komponenten werden antriebsstrangspezifisch abgeändert und angepasst. Das Brennstoffzellensystem und die elektrische Antriebseinheit werden auf die beschriebenen Maximalleistungen skaliert. Das Batteriesystem wird, wie in dem Kapitel 4.1

beschrieben, basierend auf einer HEV-Zelle bedarfsgerecht erstellt. Die FCEV-Varianten werden in dem Betriebsmodus Charge Sustaining betrieben. Für das Prognosejahr 2025 werden die in dem Kapitel 3.3 diskutierten Entwicklungen berücksichtigt.

Submodell 3 – Antriebsstrang thermisch:

Das Thermomanagement des Antriebsstrangs ist ebenfalls schematisch aufgebaut, vgl. Abbildung 5-14 auf der Seite 143. Die Kühlergrößen und Anbindungsflächen werden bedarfsgerecht ausgelegt und modelliert.

Submodell 4 – Fahrgastzelle thermisch:

Das Thermomanagement der Fahrgastzelle stellt ein Teilmodul der Gesamtfahrzeugsimulation dar. Bei der Betrachtung der FCEVs für das Betrachtungsjahr 2015 und das Prognosejahr 2025 wird dieses identisch der xEV-Varianten des Betrachtungsjahrs 2015 verwendet. Der detaillierte Aufbau und die Erklärung der Funktionen sind in dem Kapitel 5.1.1 dokumentiert.

5.3 Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor

Die betrachteten Fahrzeugvarianten mit einem Verbrennungsmotor sind ebenfalls modular aufgebaut. Die Abbildung 5-15 visualisiert die dazugehörigen Submodelle und deren Bestandteile. Der Aufbau und die Funktionen der Untergruppen werden folgend erläutert. Dabei wird auf die beiden Antriebsvarianten mit einem Ottomotor und mit einem Dieselmotor eingegangen.

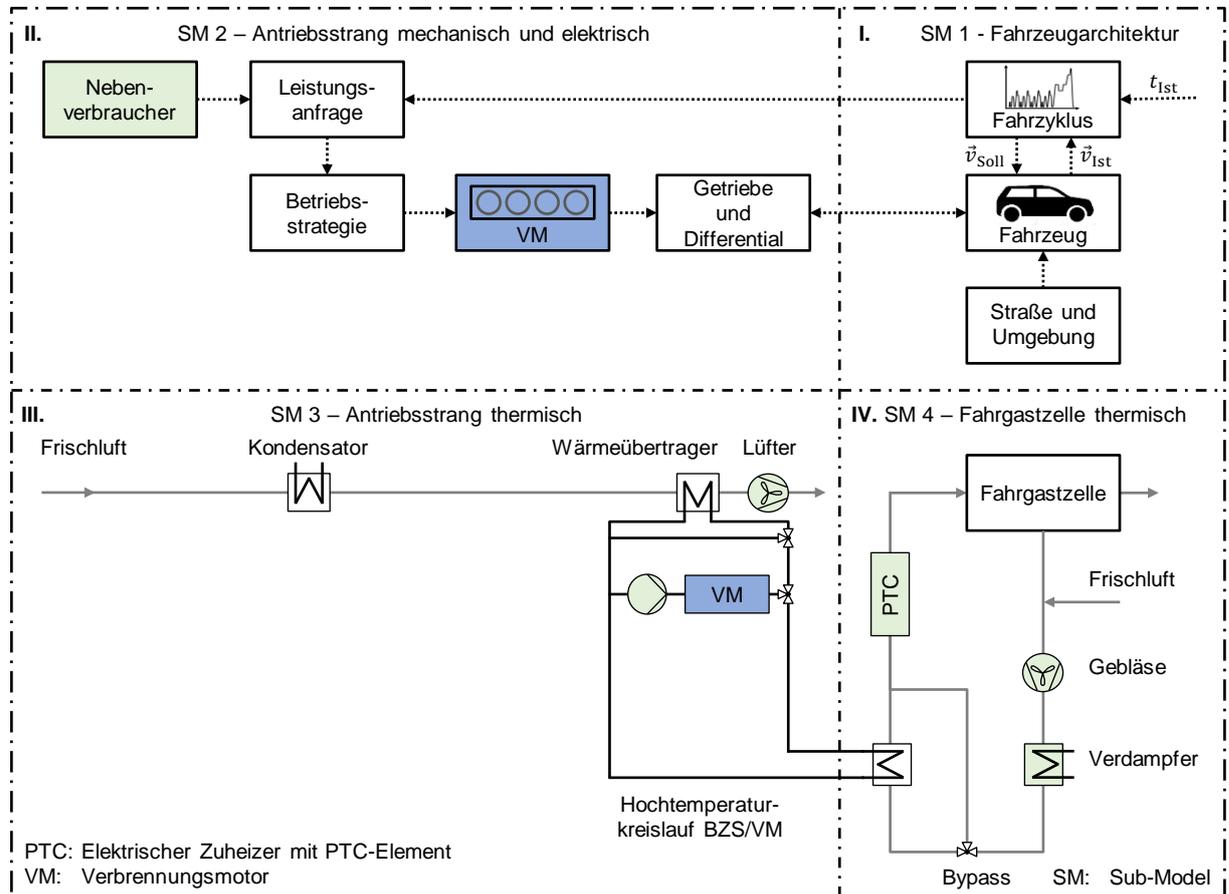


Abbildung 5-15 Schematischer Aufbau des Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor nach [115]

Submodell 1 – Fahrzeugarchitektur:

Die Fahrzeugarchitektur der Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor ist analog zu der bereits beschriebenen Unterbaugruppe der alternativen Antriebe aufgebaut. Die Parametrierung der einzelnen Komponenten, wie beispielsweise die Motormasse des jeweiligen Fahrzeugs, wird, wie in der Tabelle 5-8 ersichtlich, sowohl segment- als auch motorentypspezifisch angepasst. Die gewählten Motorleistungen entstammen jenen aus der Referenzfahrzeugbildung ermittelten Mittelwerten. Die Fahrzeugvarianten des ersten Segments werden darauf basierend mit einem Verbrennungsmotor mit 60 kW, jene des zweiten Segments werden mit einem Verbrennungsmotor mit 100 kW und jene des dritten Segments werden mit einem Otto- oder mit einem Dieselmotor mit 180 kW angetrieben. Zusammen mit den Fahrwiderständen und der Getriebeübersetzung ergibt sich für die Fahrzeugvarianten der Klein- und Kleinstwagenklasse eine Höchstgeschwindigkeit von 172,2 km/h, eine Beschleunigungszeit von 12,6 s von 0 km/h auf 100 km/h und eine Elastizitätszeit von 10,1 s von 80 km/h auf 120 km/h. Die Fahrzeugmasse inkl. Fahrer und Gepäck nach der EWG-Richtlinie 92/21 [103] beläuft sich nach dieser Auslegung auf 1 061,5 kg für die Variante Benzinfahrzeug und 1 122,5 kg für das Derivat mit einem Dieselmotor. Für die Fahrzeuge der Mittelklasse ergeben sich, eine Höchstgeschwindigkeit von 196,2 km/h, eine Beschleunigungszeit von 0 km/h auf 100 km/h von 10,5 s und eine Elastizität von 80 km/h auf 120 km/h von 8,7 s. Auf der Marktanalyse basierend, resultiert eine Fahrzeugmasse inkl. Fahrer und Gepäck von 1 401,3 kg für eine Variante mit einem Ottomotor und 1 459,8 kg für ein Derivat mit einem Dieselmotor.

Die Segmentfahrzeuge der Oberklasse erreichen eine Höchstgeschwindigkeit von 239,3 km/h, eine Beschleunigungszeit von 0 km/h auf 100 km/h von 7,2 s und eine Elastizitätszeit von 80 km/h auf 120 km/h von 4,9 s. Die sich daraus ergebenden Fahrzeugmassen inkl. Fahrer und Gepäck der beiden Antriebsvarianten der dritten Segmentklasse belaufen sich auf 1 757,7 kg für das Benzinfahrzeug und 1 808,7 kg für das Dieselfahrzeug.

Tabelle 5-8 Übersicht über die Parametrierung der ICE 2015 Segmentfahrzeuge

Parameter	ICE-G-Fahrzeug 2015			ICE-D-Fahrzeug 2015			Einheit
	Seg-1	Seg-2	Seg-3	Seg-1	Seg-2	Seg-3	
Höchstgeschwindigkeit batterieelektrisch	-	-	-	-	-	-	km/h
Höchstgeschwindigkeit BZS / VM	172,2	196,2	239,3	172,2	196,2	239,3	km/h
Beschleunigungszeit 0 km/h - 100 km/h	12,6	10,5	7,2	12,6	10,5	7,2	s
Beschleunigungszeit 80 km/h - 120 km/h	10,1	8,7	4,9	10,1	8,7	4,9	s
Reichweite batterieelektrisch	-	-	-	-	-	-	km
Reichweite BZS / VM	877,1	951,0	870,0	877,1	951,0	870,0	km
Leistung Verbrennungsmotor (VM)	60,0	100,0	180,0	60,0	100,0	180,0	kW
Leistung Elektromotor	-	-	-	-	-	-	kW
Leistung Brennstoffzellensystem (BZS)	-	-	-	-	-	-	kW
Kapazität Batteriesystem	-	-	-	-	-	-	kWh
Masse Verbrennungsmotor	76,9	104,4	164,1	118,6	148,5	195,5	kg
Masse Elektromotor	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Brennstoffzellensystem	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Batteriesystem	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Getriebe	31,3	50,1	61,7	38,3	52,3	67,7	kg
Masse Tanksystem	10,1	12,9	18,3	10,1	12,9	18,3	kg
Masse Tankinhalt	31,0	39,4	46,9	37,4	46,1	56,7	kg
Masse Abgassystem	15,2	25,8	48,1	21,1	31,3	52,1	kg
Masse verstärkter Unterboden	-	-	-	-	-	-	kg
Masse zusätzliche Kühlkreisläufe	-	-	-	-	-	-	kg
Masse elektrische Zusatzkomponenten	-	-	-	-	-	-	kg
Masse Karosserie	822,0	1 093,7	1 343,4	822,0	1 093,7	1 343,4	kg
Gesamtgewicht	986,5	1 326,3	1 682,5	1 047,5	1 384,8	1 733,7	kg
Gesamtgewicht nach EG	1 061,5	1 401,3	1 757,5	1 122,5	1 459,8	1 808,7	kg

Submodell 2 – Antriebsstrang mechanisch und elektrisch:

In dem Gegensatz zu der Fahrzeugarchitektur ändert sich der Aufbau des zweiten Submodells in dem Vergleich zu jenem der alternativen Antriebe deutlich. In der Abbildung 5-16 ist eine vereinfachte Darstellung der verwendeten Untergruppen und deren Einfluss auf den Antriebsstrang gegeben. Der Kern des Moduls ist der Antriebsstrang. Dieser wird über eine Start-Stopp-Automatik, eine Gaspedalregelung, eine Getriebesteuerung, eine Verbrennungskennfeldanalyse, eine Kupplungssteuerung und eine Nebenverbraucherregelung aktuiert, geregelt und gesteuert. Signalflüsse zwischen den Untergruppen sind in der Abbildung nicht dargestellt. Der Aufbau der ICE-Varianten wurde in dem Rahmen der betreuten Studienarbeiten [112], [115] und [215] erarbeitet. Dieser wird folgend detailliert erläutert. Ausführlichere Beschreibungen der einzelnen Unterfunktionen sind in den Studienarbeiten zu finden.

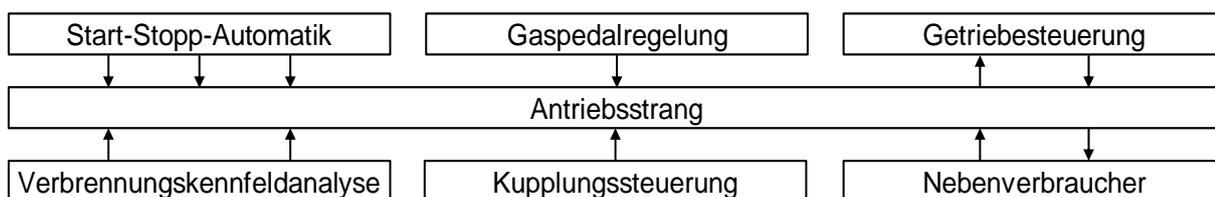


Abbildung 5-16 Untermodelle des Submodells 2 der Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor

Untermmodell Antriebsstrang:

Wie in der Abbildung 5-17 gezeigt, ist das Untermmodell Antriebsstrang mit der Antriebswelle zu dem Submodell Fahrzeugarchitektur verbunden und wird folgend von rechts nach links beschrieben. Über ein Differenzialgetriebe und über ein Getriebe wird die Winkelgeschwindigkeit der Räder in eine für den Motor passende Drehzahl gewandelt. Dabei wird die Auswahl der einzulegenden Übersetzungsstufe in dem Zertifizierungszyklus vorgegeben oder über eine Bewertung der verschiedenen Gänge hinsichtlich der damit verbundenen Fahreigenschaften und des resultierenden Kraftstoffverbrauchs situativ ausgewählt. Eine bedarfsgerechte Auswahl einer Übersetzungsstufe wird nachfolgend erläutert. Eine Schaltsvorschrift wird ausschließlich in dem Fall des Zertifizierungszykluses NEFZ bei Fahrzeugen mit einem Handschaltgetriebe verwendet, vgl. [216]. Nach einer Getriebeübersetzung folgt eine Kupplung, welche situativ angesteuert wird und den Verbrennungsmotor ein- bzw. auskuppelt. An der folgenden Motorwelle ist ein Generator über eine Kupplung verbunden. Modelliert und berücksichtigt ist dabei eine eingesetzte Übersetzungsstufe in dessen Kennfeld. Aktuiert wird der Generator über den Bedarf der Nebenverbraucher. Die dabei angeforderte Leistung wird über einen PID-Regler in Abhängigkeit des Batterieladezustands geregelt. Die Motorwelle, auf welcher auch der Generator angebracht ist, ist mit dem Verbrennungsmotor verbunden. Dieser wird bei Bedarf über einen Starter angedreht. [112]

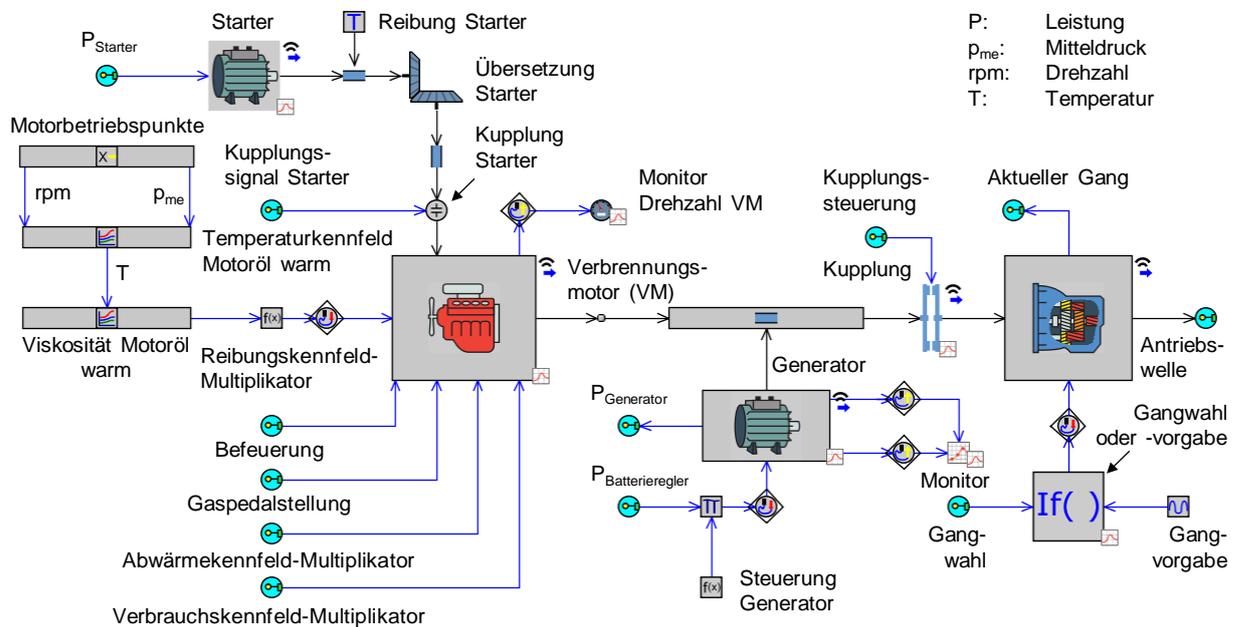


Abbildung 5-17 Aufbau des Kerns des Submodells Antriebsstrang mechanisch und elektrisch des Fahrzeugs mit einem Verbrennungsmotor in GT-SUITE, Bild aus [92]

Der Verbrennungsmotor ist, wie bereits in dem Kapitel 4.4 erläutert, kennfeldbasiert modelliert und mit den folgend beschriebenen Inputdaten parametrisiert. Der Motor wird allgemein mit dem Motortyp (Vier- oder Zwei-Takt-Motor), dem Hubraum, der Leerlaufdrehzahl und dem Motormassenträgheitsmoment parametrisiert. Zusätzlich wird der verwendete Kraftstoff über die Kraftstoffdichte, den Kohlenstoffanteil und den unteren Heizwert definiert.

Untermmodell Verbrennungskennfeldanalyse:

Über die Kennfelder der mechanischen Arbeit, der Reibleistung, des Verbrauchs und der Abwärme werden die Zustände des warmen Verbrennungsmotors ermittelt. Da der Verbrennungsmotor bei einem Start des Fahrzeugs in dem Regelfall nicht dem vermessenen Zustand des Motorprüfstands aufweist, muss eine Korrektur der Kennwerte der Kennfelder erfolgen. Diesbezüglich wird, wie in dem Kapitel 4.4 beschrieben, eine Anpassung über einen Reibungs-, einen Abwärme- und einen Verbrauchs-Kennfeld-Multiplikator durchgeführt. Der Verbrennungsmotor wird zudem durch die Befeuerung gesteuert und über die Gaspedalstellung geregelt. Alle Eingaben erfolgen fahrzeugspezifisch.

Untermmodell Getriebesteuerung:

Wird der Gang nicht vorgegeben, erfolgt eine Auswahl jener für den aktuellen Lastfall passenden Übersetzungsstufe. Die Abbildung 5-18 stellt den dabei durchgeführten Selektionsprozess vereinfacht dar. Der Aufbau der Bewertung der Übersetzungsstufen erfolgt jeweils identisch. Folgend wird deshalb der Auswahlprozess und der Aufbau anhand einer Getriebestufe stellvertretend für jede Einzelne anhand der Abbildung 5-19 in dem Detail erläutert.

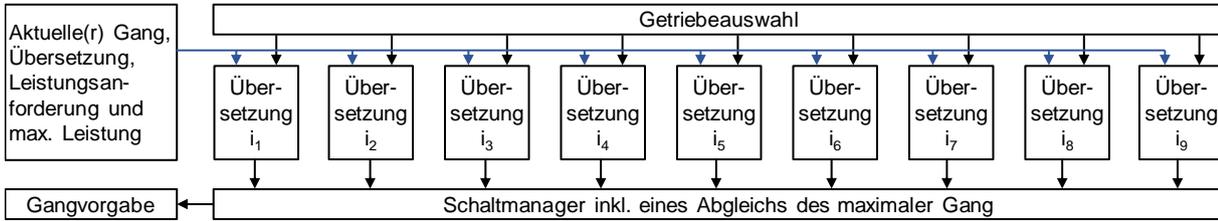


Abbildung 5-18 Übersicht Auswahl Übersetzung

Über eine variable Getriebeauswahl wird zunächst die verwendete Getriebevariante fahrzeugspezifisch ausgewählt. Während einer Fahrt wird sowohl die aktuelle Übersetzungsstufe als auch jene der möglichen Gänge ermittelt. Darauf basierend werden für jeden Gang die Drehzahl, der Mitteldruck und die maximale Leistung (über die Vollastlinie) prädiert. Mithilfe des Mitteldrucks und der Drehzahl wird der gangspezifische Verbrauch ermittelt und mit dem minimalen Verbrauch zu der Verbrauchsgewichtung in Relation gesetzt (maximales Gewichtungsergebnis: 1). Mithilfe der aktuell maximal möglichen Leistung und der momentanen Lastanforderung wird eine umsetzbare Überschussleistung ermittelt. Diese wird in dem Beschleunigungsvorgang bei einer Gaspedalstellung größer als 70 % und einer Geschwindigkeitsabweichung größer als 5 km/h zu der Zyklusgeschwindigkeit bezogen auf die maximale Leistung gewichtet (maximales Gewichtungsergebnis: 1). Zusätzlich wird das Verhältnis der gangspezifischen Drehzahl zu der Leerlaufdrehzahl gebildet (maximales Gewichtungsergebnis: 1), um die Drehzahl möglichst gering, den Mitteldruck somit hoch und den Verbrauch in der Regel niedrig zu halten. Anschließend werden die einzelnen Bewertungen anhand variabel einstellbarer Gewichtungsfaktoren aufsummiert und der höchst bewertete Gang selektiert. Die kontinuierliche Auswahl der Übersetzungsstufen erfolgt dabei mit einer Hysterese, um ein permanentes Wechseln zwischen zwei Gängen zu verhindern. Das Schalten in eine höhere Übersetzungsstufe wird durch einen niedrigeren Hysterese-Wert in dem Vergleich zu dem Schalten in einen niedrigeren Gang bevorzugt. Die Abbildung 5-19 stellt den Aufbau und die Modellierung der Bewertung und der Auswahl der Übersetzungsstufe dar. [112]

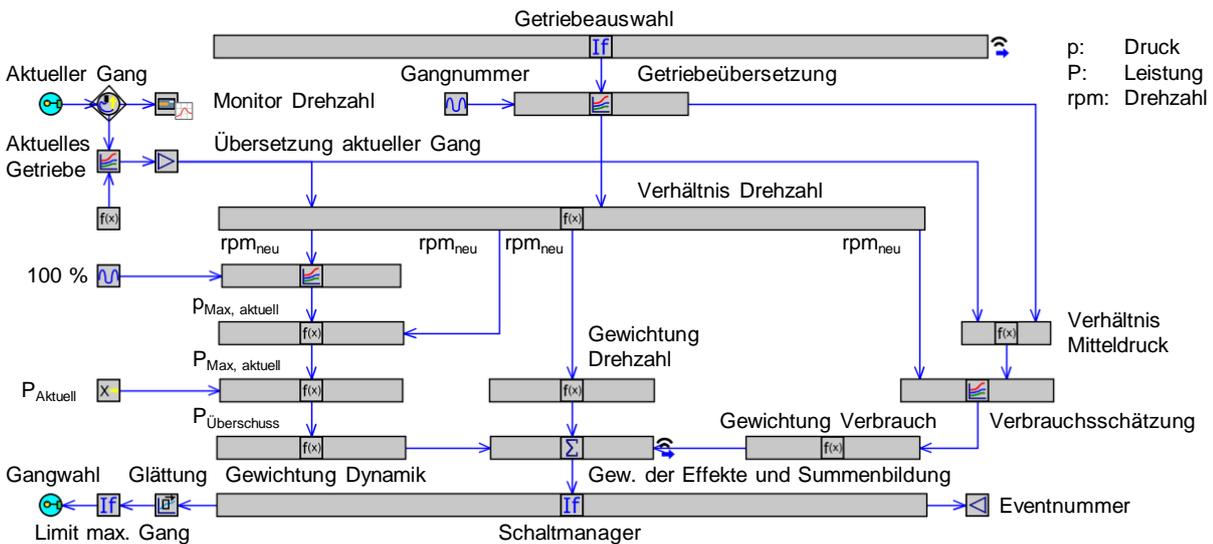


Abbildung 5-19 Aufbau der Bewertung einer Übersetzungsstufe in GT-SUITE nach [112], Bild aus [92]

Untermmodell Kupplungssteuerung:

Nach dem Getriebe ist eine Kupplung eingebaut, welche dazu dient, den Motor ein- bzw. auszukuppeln. Die Steuerung der Kupplung erfolgt dabei anhand Kriterien, welche in der Start-Stopp-Logik bestimmt werden. Prinzipiell wird in der Kupplungssteuerung unterschieden, ob die Kupplung normal oder schnell eingekuppelt, oder ob ein Auskuppelungsprozess eingeleitet werden soll. Der Ausgang der Kupplungssteuerung gibt sowohl einen Status der Kupplung als auch eine Zeitdauer aus, mit welcher eine Kupplungskennlinie aktuiert wird. Über eine Kennlinie wird die Anpresskraft definiert. Anfangs schließt die Kupplung, bis eine ausreichende Reibpaarung vorhanden ist, moderat und darauffolgend zügig. Die Abbildung 5-20 stellt den Aufbau der Kupplungssteuerung dar. [112]

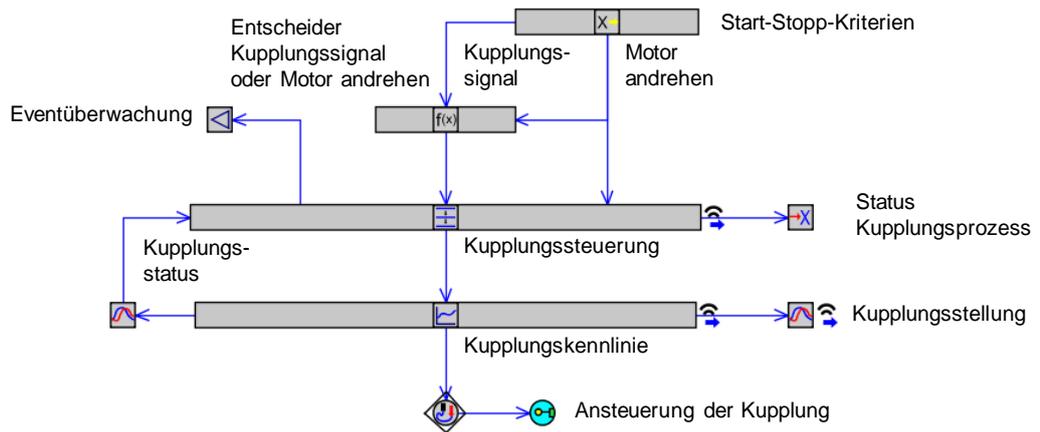


Abbildung 5-20 Aufbau der Kupplungssteuerung in GT-SUITE nach [112], Bild aus [92]

Untermmodell Nebenverbraucher:

Neben einer Antriebsleistung muss ein Verbrennungsmotor auch eine elektrische Leistung der Nebenverbraucher über einen Generator bereitstellen. Die Abbildung 5-21 visualisiert den Aufbau und die Modellierung der Nebenverbraucher. Die aktuelle Leistungsanforderung an den Generator wird über einen Batterieregler bestimmt. Dieser hat als Zielwert einen Soll-Ladezustand. Diesen vergleicht der Regler mit dem aktuellen Ladezustand und regelt die Abweichung ein. Über die Differenz der sich daraus ergebenden Leistung des Generators und jener der Nebenverbraucher wird die 12-V-Batterie geladen oder entladen. Der Bedarf der Nebenverbraucher setzt sich dabei aus der Leistung der Wasserpumpe, des Klimakompressors, des Luft-PTCs, des Lüfters, des Gebläses, des Starters, des Brems-, des Abblend- und des Tagfahrlichts, der Heckscheibenheizung, der Lenk- und der Bremsunterstützung, des Navigationssystems, des Radios und der Motorelektronik zusammen.

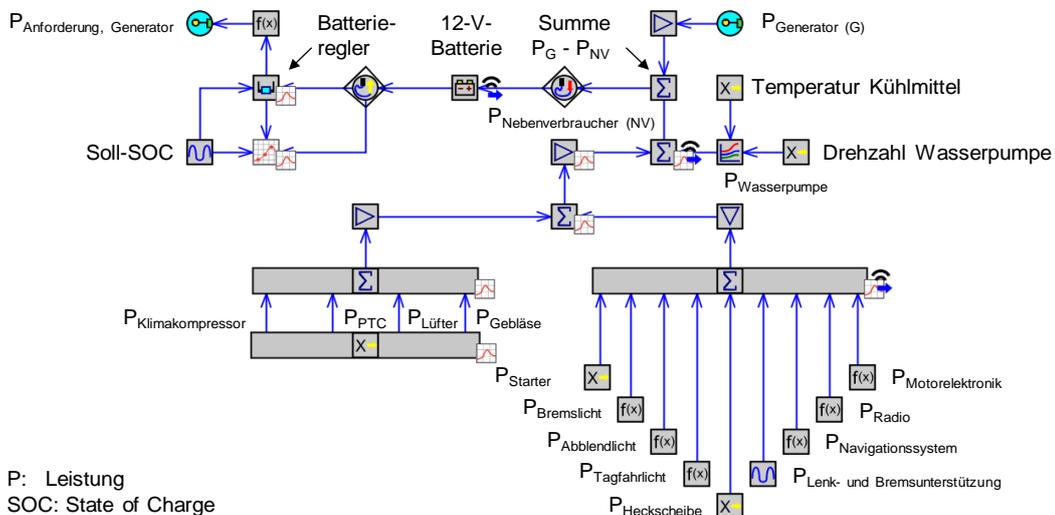


Abbildung 5-21 Aufbau der Nebenverbraucher bei den ICE-Varianten in GT-SUITE, Bild aus [92]

Untermmodell Gaspedalregelung:

Die sich aus der Anforderung der Nebenverbraucher und jener der Fortbewegung ergebenden Leistungsanforderung wird über den Verbrennungsmotor bereitgestellt. Die dabei angewandte Gaspedalregelung wird folgend anhand der Abbildung 5-22 erläutert. In der Gaspedalregelung sind zwei Regler verbaut. Der Gaspedalregler (GPR) regelt dabei die durch die Differenz der Ist- zu der Sollfahrzeuggeschwindigkeit ermittelte Anforderungsleistung, während der Leerlaufregler (LLR) die Drehzahl des Verbrennungsmotors in dem Stand einregelt. Der GPR wird deaktiviert, sofern ein Bremsereignis, ein Überschwingen der Geschwindigkeit oder ein Signal der Start-Stopp-Regelung zu der Deaktivierung auftritt. Ist dies nichtzutreffend, regelt der GPR die Bedarfsleistung und gibt eine Gaspedalstellung (GPS) zwischen 0 und 100 aus. Der LLR wird aktiviert, sobald die aktuelle Motordrehzahl kleiner als die Leerlaufdrehzahl +50 1/min und die Pedalstellung geringer als 2 % ist. Die Sollgröße des LLRs wird in Abhängigkeit der Nebenverbraucherleistung angepasst. Wird eine erhöhte Leistung benötigt, wird die Zielgröße angehoben. Ist dies nicht der Fall, gibt der LLR die GPS des GPRs unverändert weiter. Über eine Anfahrüberlagerung wird bei dem Einkuppeln und einer gleichzeitig geringen Fahrzeuggeschwindigkeit die GPS in einem Bedarfsfall angepasst, um ein zügiges Anfahren zu gewährleisten. Nach der Anfahrüberlagerung folgt eine Segelüberlagerung, welche die GPS auf null setzt, sofern der Motor ausgekuppelt werden soll und die Fahrzeuggeschwindigkeit ausreichend hoch ist. Anschließend wird in dem nächsten Logikblock zunächst überprüft, ob der Verbrennungsmotor aktiv ist, folgend die GPS geglättet und abschließend die Drehzahl des Verbrennungsmotors mit der Maximaldrehzahl verglichen und gegebenenfalls reduziert, um ein Überdrehen des Motors auszuschließen. [112]

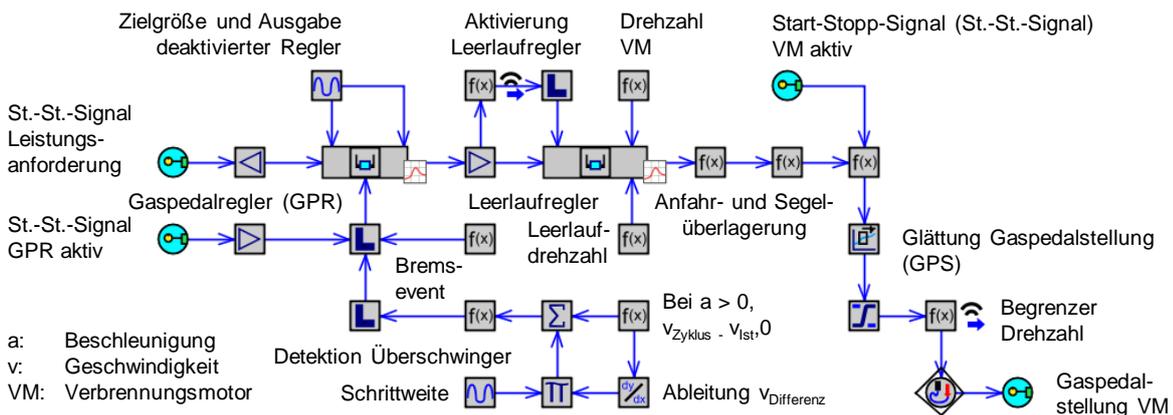


Abbildung 5-22 Aufbau der Gaspedalregelung in GT-SUITE nach [112], [115], Bild aus [92]

Untermmodell Start-Stopp-Automatik:

Das Zusammenspiel des GPRs, der Kupplung, des Verbrennungsmotors und der Getriebesteuerung wird in einer Start-Stopp-Automatik geregelt. Anhand der Abbildung 5-23 wird diese detailliert erläutert.

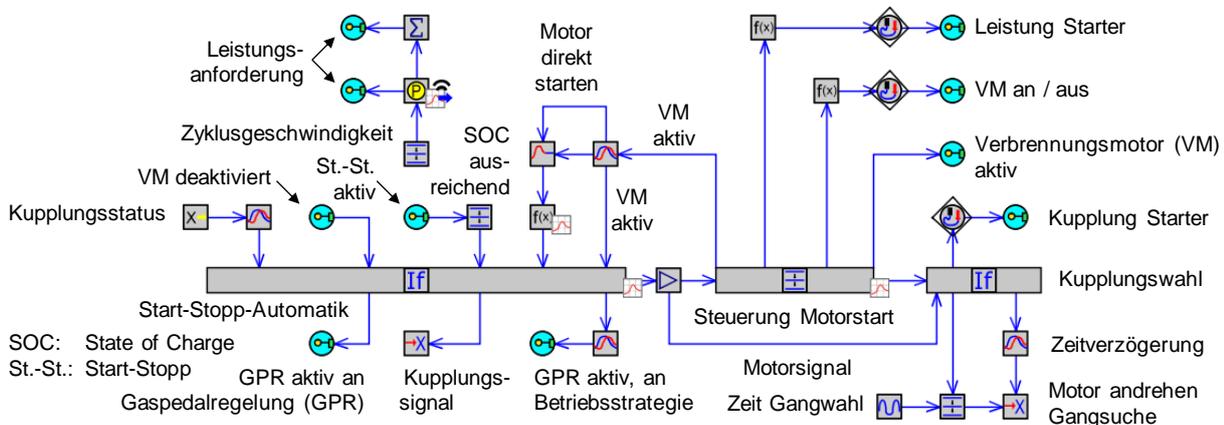


Abbildung 5-23 Aufbau der Start-Stopp-Automatik in GT-SUITE nach [112], [115], Bild aus [92]

In der Start-Stopp-Automatik werden neben den direkt sichtbaren Eingabegrößen „Kupplungsstatus“, „Verbrennungsmotor deaktiviert“, „Start-Stopp aktiv“, „Motor direkt starten“ und „Verbrennungsmotor aktiv“ auch weitere Kennwerte, wie beispielsweise die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Fahrzeugs und des Zyklus, die Kupplungsstellung, die mechanische Bremsleistung, der Ladezustand der Batterie, die Fahrzeit, die Öltemperatur des Motoraustritts und die aktuelle Nebenverbraucherleistung verarbeitet. In einem If-Then-Else-Template der Software GT-SUITE, welches boolesche Ausdrücke prüft und auf Basis der erzielten Wahrheitswerte Aktionen ausführt, werden diese Eingangsgrößen prozessiert. In einer weiteren Wenn-Dann-Abfrage wird entschieden, ob der Motor gestartet, abgestellt oder in dem Leerlauf gehalten wird. Sind der Ladezustand der Batterie und die Öltemperatur ausreichend hoch, der Motor initial für 40 s an und soll der Motor erneut gestartet werden, gibt die Start-Stopp-Automatik ein positives Motorsignal aus und die Steuerung des Motorstarts läuft an. Die hier modellierte Motorsteuerung kontrolliert dabei den Starter, steuert die Aktoren, die es ermöglichen den Verbrennungsmotor zu betreiben, und gibt der If-Then-Else Abfrage „Kupplungswahl“ das Signal zu dem Einkuppeln. In der Kupplungswahl wird anschließend entschieden, ob das Andrehen des Motors über den Starter oder über einen sog. Anreißstart über die Kupplung umgesetzt wird. Für die Fahrzeugvarianten der Mittel- und der Oberklasse wird angenommen, dass in dem Betrachtungsjahr 2015 eine Start-Stopp-Automatik verbaut ist. Neben dem Starten des Motors wird zudem die Leistungsanforderung in diesem Untermodell berechnet, welche über die Gaspedalregelung umgesetzt wird. Bei der Energieumwandlung entsteht eine Verlustleistung, diese wird in dem dritten Submodell verarbeitet. [112]

Submodell 3 – Antriebsstrang thermisch:

Das dafür benötigte Thermomanagement der konventionellen Antriebe ist unterschiedlich zu jenem der alternativen Antriebe aufgebaut. Die Abbildung 5-24 stellt den in dieser Arbeit verwendeten Aufbau des dritten Submodells der Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor dar.

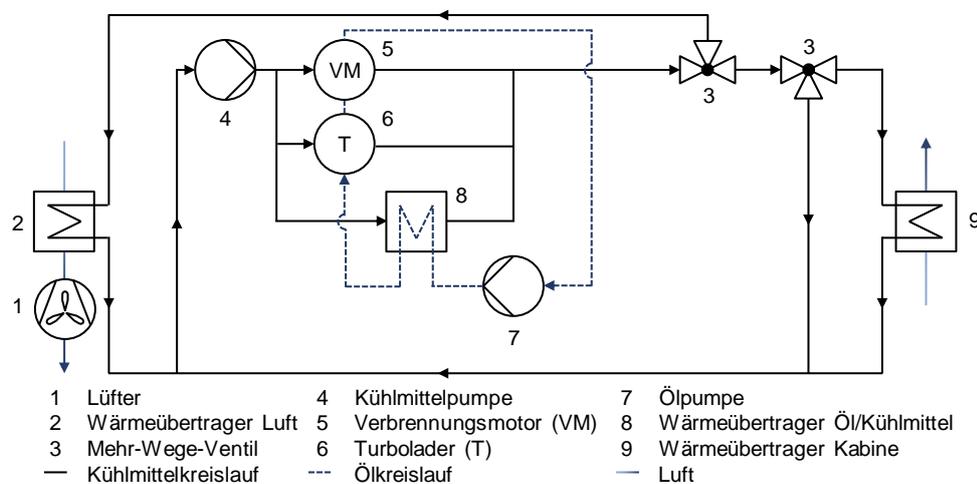


Abbildung 5-24 Schematischer Aufbau des Hochtemperaturkreislaufs eines Verbrennungsmotors nach [170]

Der Verbrennungsmotor und der Abgasturbolader sind sowohl mit Kühlmittel als auch mit Öl durchflossen und werden mit den beiden Fluidströmungen, welche über die Kühlmittel- und die Ölpumpe geregelt werden, gekühlt. Ist der Verbrennungsmotor anfänglich noch nicht auf dessen Betriebstemperatur, werden die 3-Wege-Ventile so geschaltet, dass das Kühlmittel nicht über die Wärmeübertrager läuft. Damit wird sichergestellt, dass keine (bzw. wenig) Wärme abgegeben wird und der Verbrennungsmotor zügig dessen Betriebstemperatur erreicht. Ein aufgewärmter Zustand wird zeitnah angestrebt, da die Motorverluste bei kalten Bedingungen aufgrund der höheren Reibanteile und der höheren Wärmeverluste erhöht sind, vgl. Kapitel 4.4. Wird der initiale Aufwärmvorgang abgeschlossen und somit eine erste Grenztemperatur erreicht, öffnet in einem Bedarfsfall das erste Ventil die Kühlmittelströmung zu dem Wärmeübertrager der Kabine. Steigt die Motortemperatur weiter an oder liegt kein Heizfall vor, öffnet

das zweite Mehr-Wege-Ventil und die Kühlmittelaustrittstemperatur wird in Abhängigkeit der Bypass-Stellung geregelt. Dabei wird über den Volumenstrom über den Wärmeübertrager in dem Luftpfad des Motorraums die abgegebene Wärme reguliert. Wird der Bypass komplett geöffnet und reicht der Wärmestrom über den Wärmeübertrager zu der Luft nicht aus, um die Betriebstemperatur des Verbrennungsmotors zu halten, wird ein Lüfter eingeschaltet, um die mögliche Wärmeabgabe durch eine Steigerung des Luftmassenstroms zu erhöhen. Der detaillierte Aufbau des Verbrennungsmotors und des Abgasturboladers ist in dem Kapitel 4.4 beschrieben. [112]

Submodell 4 – Fahrgastzelle thermisch:

Das in dieser Arbeit verwendete Thermomanagement der Fahrgastzelle für Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor unterscheidet sich in dem Wesentlichen nur durch den Wegfall des Hochvolt-Wasser-PTCs und den Einbau eines Niedervolt-Luft-PTCs gegenüber dem angenommenen Thermomanagement des alternativen Antriebs des Betrachtungsjahrs 2015. Die restlichen Eigenschaften der Temperierung der Kabine werden identisch modelliert. Der Luft-PTC hat segmentspezifisch eine Leistung von bis zu 2,5 kW und erwärmt die Fahrgastzelle bei einer noch nicht ausreichender Wärmebereitstellung über den Heizungswärmeübertrager. Ist durch einen längeren Betrieb des Verbrennungsmotors genügend Abwärme vorhanden, wird der Luftstrom durch die Bypass-Stellung so geregelt, dass dieser durch den Heizungswärmeübertrager strömt und sich erwärmt. Wird dabei ein ausreichender Wärmestrom realisiert, wird der Luft-PTC ausgeschaltet. Ist dies zutreffend, werden der Generator und folglich der Verbrennungsmotor mechanisch entlastet.

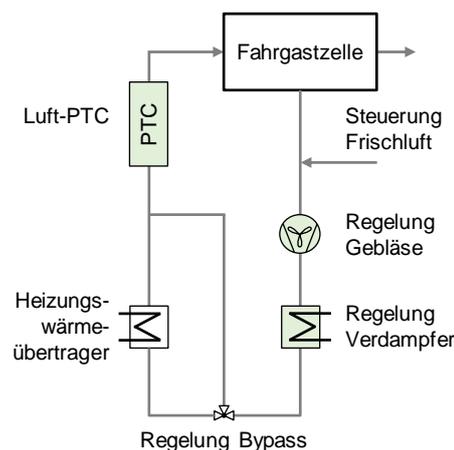


Abbildung 5-25 Aufbau des Thermomanagements der Fahrgastzelle bei einem Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor

Nachdem der Aufbau und die Modellierung der verschiedenen Antriebsvarianten in diesem Kapitel detailliert vorgestellt, die Validierung in dem vierten Kapitel erfolgte und die angewandte Methodik in dem dritten Abschnitt erläutert wurde, wird in dem anschließenden Abschnitt eine umfangreiche Auswertung verschiedener Einflüsse auf den Energiebedarf durchgeführt.

6 Analyse des gesamtheitlichen Energiebedarfs 2015 und 2025

Die, auf den Nebenverbrauchern und der Fahrsituation basierenden, Effekte auf den Energiebedarf werden folgend dediziert analysiert. Zunächst wird der Einfluss verschiedener Zyklen für das Betrachtungsjahr 2015 untersucht. Diese separate, initiale Evaluierung dient dem Zweck, die Auswirkungen des jeweiligen zyklusspezifischen Lastkollektivs getrennt zu untersuchen. Darauf aufbauend wird anschließend die Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher betrachtet und basierend auf einer Referenz ohne Nebenverbraucher der resultierende Mehrbedarf bewertet. In einem ersten Schritt wird eine Analyse des Einflusses unterschiedlicher Fahrzyklen durchgeführt und in einem zweiten Schritt die Auswirkungen der Nebenverbraucher antriebsstrangspezifisch untersucht. Eine Betrachtung des Energiebedarfs inklusive der resultierenden Zusatzleistung wird dabei zunächst unter länderspezifischen, saisonalen Wetterbedingungen, unter differenzierte Startbedingungen und unter extremen Klimaszenarien, bewertet. Anschließend wird der gesamtheitliche Energiebedarf flotten- und nutzerspezifisch analysiert. Dazu werden jene aus der Mobilitätsstudie „MID2008 – Mobilität in Deutschland 2008“ [96] abgeleitete Fahrverhalten, vgl. dazu Kapitel 3.1.1, repräsentativ für ein Flottenfahrverhalten der deutschen Bevölkerung und drei definierte Nutzerprofile untersucht. Abgerundet wird die Analyse der diversen Einflüsse auf den gesamtheitlichen Energiebedarf mit einer Betrachtung einer exemplarischen Weiterentwicklung der Antriebsstrangvarianten batterieelektrisches und brennstoffzellenbetriebenes Fahrzeug. Auch hier wird zunächst der Einfluss der Zyklen und anschließend jener der Nebenverbraucher bewertet.

6.1 Betrachtungsjahr 2015

6.1.1 Fahrzyklus

Für eine Ermittlung der beschriebenen Referenz des zyklusspezifischen Verbrauchs werden die Antriebsvarianten ohne den Einfluss zusätzlicher, nicht für den Fahrbetrieb notwendiger, Nebenverbraucher untersucht. Dazu werden alle Antriebskonfigurationen mit den Lastkollektiven der zu dem jeweiligen Betrachtungsjahr relevanten Zertifizierungszyklus (Jahr 2015: NEFZ; Jahr 2025: WLTC) und den Artemisfahrprofilen Innerorts (IO), Außerorts (AO) und Autobahn (AB) analysiert. In der Simulation wird eine konstante Umgebungstemperatur von 25 °C, ein Luftdruck von 1 bar, eine Luftfeuchtigkeit von 50 %, ein geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsbeiwert bei einer konstanten Reifenschultertemperatur von 35 °C⁴⁹ und ein konstanter Mindestbedarf für essenzielle Nebenverbraucher, analog der Studie [6], herangezogen. Die genannten Zyklen werden zusammen mit einem, über der Verteilung der Fahrleistung von 30 % IO, 40 % AO und 30 % AB aus der Fahrleistungserhebung [97] gewichteten, kombinierten Artemisverbrauch gegenübergestellt. In dem Betrachtungsjahr 2015 wird für extern aufladbare Varianten ein durchschnittlicher Ladewirkungsgrad von 85 %, vgl. hierzu [6], [169], [202] und [217] berücksichtigt. Für das Prognosejahr 2025 wird ein verbesserter Ladewirkungsgrad von 90 % angenommen. Die kombinierten Verbrauchswerte der PHEV- und der REEV-Varianten werden mit einem, in dem Fachbereich, sog. „utility factor“⁵⁰ ermittelt. Dieser beschreibt den Anteil der Charge-Depleting-Fahrleistung. Für das Betrachtungsjahr 2015 wird für die Berechnung des kombinierten Verbrauchs analog der ECE-Norm R101 [25] vorgegangen. In dieser wird der kombinierte Energiebedarf über

$$C = \frac{(D_{el} \cdot C_1 + D_{av} \cdot C_2)}{(D_e + D_{av})} \quad (6-2)$$

berechnet. Der kombinierte Energieverbrauch (engl. consumption) pro einhundert Kilometer C wird über die fahrstreckengewichteten Verbrauchswerte des Energiebedarfs in dem Modus Charge Depleting C_1 und in dem Modus Charge Sustaining C_2 bestimmt. Sowohl die rein batterieelektrische Reichweite D_{el}

⁴⁹ Eine Fixierung der Reifenschultertemperatur wird gewählt, da bei einer Ermittlung einer Ausrollkurve von einer nahezu konstanten Reifentemperatur ausgegangen werden kann und der Rollwiderstand dadurch realitätsnah repräsentiert wird.

⁵⁰ Utility factor: engl. Begriff. Z. Dt. Nutzungsfaktor. Beschreibt das Verhältnis der primären, rein elektrischen, zu einer sekundären Fahrdistanz (in der ECE-Norm R101 konstant 25 km).

als auch eine, in der Richtlinie ECE R 101 definierte, 25 km lange Distanz D_{av} zwischen zwei Batterieaufladungen, werden dabei als Gewichtungsfaktoren herangezogen. Für eine Ermittlung des Energiebedarfs in kWh/100 km werden für den jeweiligen Energieinhalt der einzelnen Energieträger analog den Angaben des Well-to-Tank-Berichts [73] der JEC 33,36 kWh/kgH₂, 8,94 kWh/l_{Benzin} und 9,96 kWh/l_{Diesel} für die Energieträger Wasserstoff, Benzin- und Dieselmotoren verwendet. Für konventionelle Fahrzeuge mit einem manuellen Getriebe (Segment 1 und Segment 2) wird eine in dem NEFZ vorgeschriebene Schaltstrategie herangezogen [216]. Für alle weiteren Zyklen und für das Segment-3-Fahrzeug erfolgt die Wahl der Übersetzungsstufe nach der optimierten Schaltstrategie, vgl. Kapitel 5.3.

Die Abbildung 6-1 auf der Seite 161 stellt die berechneten Energiebedarfswerte in kWh pro 100 km für die Antriebsvarianten BEV, FCEV, FC-REEV, FC-PHEV, ICE-G- und ICE-D-Fahrzeug für das Betrachtungsjahr 2015 dar. In der Darstellung sind in dem Diagramm a) die Segment-1-, in dem Diagramm b) die Segment-2- und in dem Diagramm c) die Segment-3-Ergebnisse gegenübergestellt. Folgend wird zunächst der Einfluss der Antriebsformen und anschließend jener der Zyklen diskutiert. Danach wird jener über die Fahrleistung gewichteter Artemisverbrauch mit dem Energiebedarf in dem Zertifizierungszyklus verglichen. Nachkommend wird die Änderung des Energiebedarfs basierend auf der Segmentklasse betrachtet und abschließend wird der festgestellte Zertifizierungsbedarf mit Angaben existierender Fahrzeugvarianten in Relation gesetzt, um die Ergebnisse besser einschätzen zu können.

Werden zunächst die **Antriebsformen** verglichen, fällt auf, dass die konventionellen Varianten (Benzin- und Dieselfahrzeug) den höchsten Energiebedarf aufweisen. Dieser liegt über die Fahrzyklen und über die Segmente hinweg minimal bei ca. 35 kWh/100 km (Segment 1 Artemis AO) und maximal bei ca. 80 kWh/100 km (Segment 3 Artemis IO). Der in dem Vergleich zu den alternativen Antriebsvarianten hohe Energieverbrauch beruht dabei auf einem in dem Bezug zu einem Elektromotor niedrigeren Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors. Werden die alternativen Varianten in Relation zueinander gesetzt, zeigt sich, dass die reinen Batteriefahrzeugderivate generell die geringsten Energiemengen umwandeln. Der Energiebedarf der effizientesten Antriebsvariante liegt minimal bei etwa 12 kWh/100 km (Segment 1 Artemis AO) und maximal bei etwa 28 kWh/100 km (Segment 3 Artemis AB). Die FC-REEV- und die FC-PHEV-Varianten besitzen aufgrund der anteilig berechneten Fahrleistung des CS-Modus einen, in dem Vergleich zu den BEV-Varianten, leicht erhöhten Verbrauch. Durch das größere Batteriesystem und einen damit erhöhten CD-Anteil sind die Energieangaben der FC-REEV-Fahrzeuge in Korrelation zu den FC-PHEV-Ausführungen etwas reduziert und liegen minimal bei ca. 14 kWh/100 km (Segment 1 Artemis AO) und maximal bei ca. 30 kWh/100 km (Segment 3 Artemis AB), während die FC-PHEV-Verbrauchswerte bei den gleichen Kombinationen minimal bei etwa 15 kWh/100 km und maximal bei etwa 31 kWh/100 km liegen. Der Energiebedarf der reinen Brennstoffzellenvarianten ist aufgrund einer, in dem Vergleich zu dem Batteriesystem, niedrigeren Effizienz des Brennstoffzellensystems erhöht. Minimal werden ca. 19 kWh/100 km (Segment 1 Artemis AO) und maximal ca. 39 kWh/100 km (Segment 3 Artemis AB) benötigt.

Werden die einzelnen **Zyklen**, anstatt der Antriebsformen verglichen, wird übergreifend festgestellt, dass der Artemis Außerortszyklus gefolgt von dem NEFZ- und von dem Artemis Innerorts- bzw. von dem Artemis Autobahnzyklus den niedrigsten Energiebedarf aufweist. Bei den konventionellen Varianten folgt nach den Verbrauchswerten in dem Zertifizierungszyklus der Energiebedarf des Artemis Autobahn- und anschließend jener des Artemis Innerortszykluses, während bei den alternativen Antrieben die Reihenfolge umgekehrt zutrifft. Der niedrigere Energieverbrauch des Außerortszykluses resultiert aus einem, für die Antriebssysteme, günstigen Lastprofil mit einer moderaten Geschwindigkeit, mittleren Fahrwiderständen und geringen Standzeiten. Hingegen ist der NEFZ-Bedarf sowohl aufgrund des erhöhten Anteils der Standphasen und der synthetischen Lastpunkte als auch aufgrund der Schaltvorgabe für manuelle Getriebe [216] in dem Vergleich zu dem Außerortszyklus leicht erhöht. Besonders auffallend ist bei den simulierten NEFZ-Verbräuchen, dass das Dieselfahrzeug des dritten Segments den höchsten Verbrauchswert aufweist. Dieser beruht zu dem einen darauf, dass trotz eines Verbrauchsvorteils bei einer Betrachtung in Litern pro einhundert Kilometer der Energiebedarf aufgrund der erhöhten

Energiedichte des Dieselmotors bei einem Vergleich in kWh/100 km höher ausfällt und zu dem anderen beruht es darauf, dass der Verbrauchswert des Benzinfahrzeugs des dritten Segments in dem Vergleich zu den existierenden Fahrzeugen optimistisch ist, vgl. dazu Abbildung 6-2 auf der Seite 164.

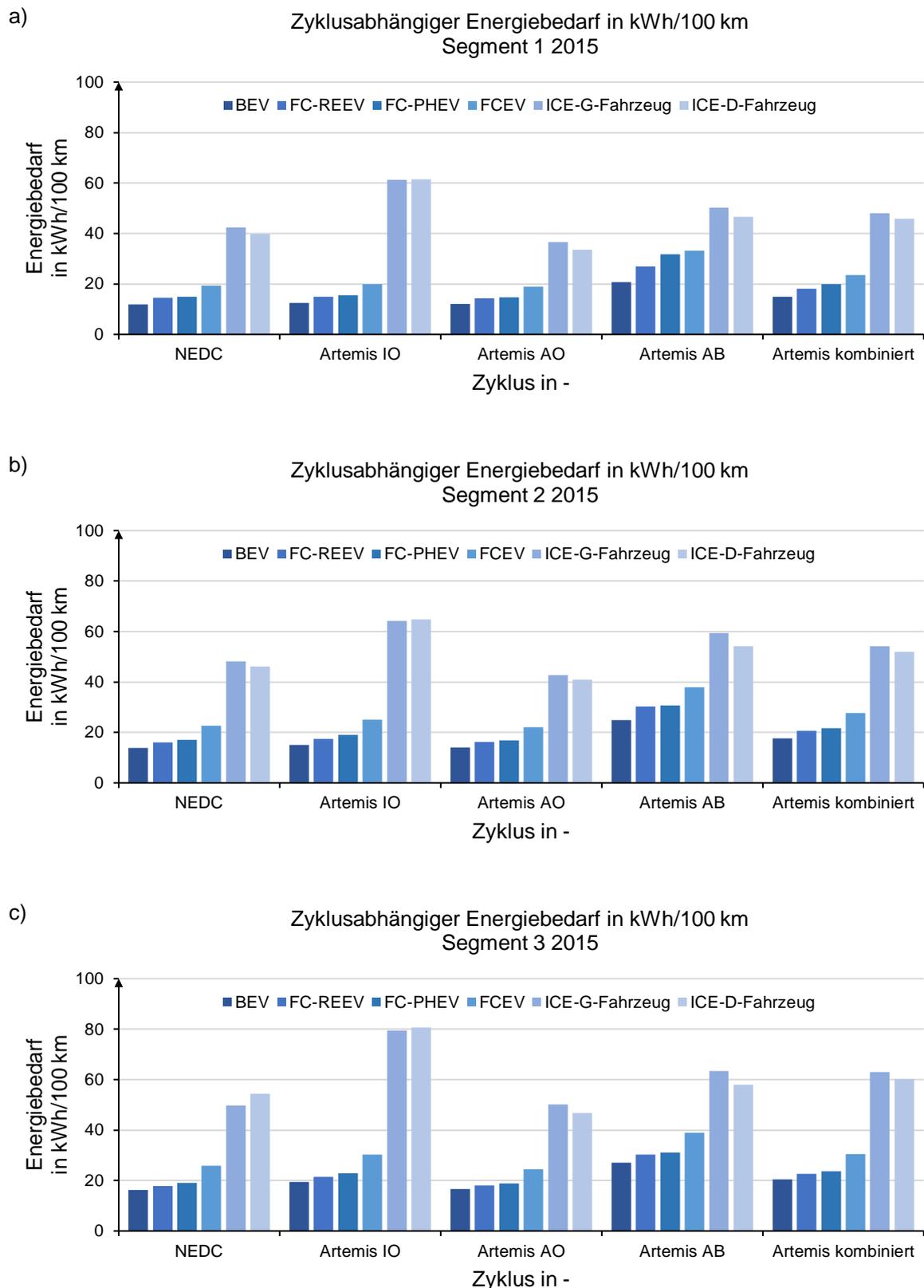


Abbildung 6-1 Vergleich des zyklusabhängigen Energiebedarfs der unterschiedlichen Antriebsvarianten in dem Betrachtungsjahr 2015 für a) das Segment 1, b) das Segment 2 und c) das Segment 3

Für die konventionellen Fahrzeugvarianten sind die ermittelten Energiemengen für einhundert Kilometer auf der Autobahn (Fahrprofil Artemis AB) in dem Vergleich zu dem Innerortsprofil niedriger, während für alternative Antriebe das Gegenteil zutreffend ist. Der erhöhte Energiebedarf des Innerortszyklus der konventionellen Derivate lässt sich durch eine Vielzahl von Einflüssen erklären. Sowohl bei den Varianten mit einem Verbrennungsmotor als auch bei einer reinen CS-Betrachtung werden die Fahrprofile nur einmal durchfahren, während in dem CD-Modus das Batteriesystem komplett entladen wird und die Zyklen somit mehrfach absolviert werden. Resultierend ist der Verbrennungsmotor in dem Innerortsfahrprofil aufgrund einer geringen Fahrleistung noch nicht auf einer hohen Betriebstemperatur. Erhöhte Reibungs- und erhöhte Wärmeverluste sind die Folge. Zudem ist die Start-Stopp-Automatik teilweise noch nicht einsatzbereit. Folglich wird der Verbrennungsmotor in dem Stillstand und bei ineffizienten Betriebspunkten betrieben, was unweigerlich zu einem erhöhten Verbrauch führt. Neben dem Aufwärmeeffekt und den Betriebspunkten mit einer niedrigen Last sind die permanenten Geschwindigkeitsänderungen bei konventionellen Antrieben ohne eine Möglichkeit einer Rekuperation nachteilig. In dem Vergleich zu dem Innerortsprofil sind die Fahrwiderstände des Autobahnzyklus aufgrund eines erhöhten Geschwindigkeitsprofils höher. Dennoch wird aufgrund von Lastpunkten mit einem niedrigen spezifischen Verbrauch, einem teilweise aufgewärmten Motor und lediglich einer Standphase ein niedrigerer Durchschnittsverbrauch bei konventionellen Antriebskonfigurationen festgestellt. Dieser Effekt lässt sich ebenfalls durch mehrere Einflüsse erklären. Durch eine, in dem Vergleich zu dem Innerortszyklus, höhere Lastanforderung wird der Motor in dem Verbrauchskennfeld in einem verbrauchsgünstigeren Bereich betrieben. Daraus resultiert, dass die erhöhten Fahrwiderstände sich nicht linear auf den Verbrauch auswirken. Zudem erreicht der Motor aufgrund einer erhöhten Last schneller seine Nominaltemperatur, was in reduzierte Reib- und in reduzierte Wärmeverluste mündet. Des Weiteren sind weniger Bremsvorgänge, welche ohne eine Möglichkeit einer Rekuperation kinetische Energie in thermische (nicht nutzbare) Energie umwandeln, und weniger Stopp-Phasen in dem Autobahnzyklus enthalten. Daraus folgt, dass der eingesetzte Kraftstoff effizienter für die zu überwindende Fahrstrecke aufgebracht wird. In dem Gegensatz zu den betrachteten, konventionellen Antrieben ist bei den alternativen Antrieben der Zyklen-Verbrauch in dem Fahrprofil Artemis Innerorts immer niedriger als in dem Zyklus Artemis Autobahn. Der Wechsel der Reihenfolge der Geschwindigkeitsprofile basiert auf der technischen Machbarkeit der Rekuperation, welche es erlaubt die Bremsenergie teilweise erneut für den Antrieb zu verwenden, auf verringerten Fahrwiderständen des Innerorts- gegenüber dem Autobahnzyklus, auf der Möglichkeit Standphasen ohne zusätzlichen Energiebedarf des Motors zu überbrücken und auf einer wiederholenden Durchfahrt der Zyklen.

Wird der über die **Fahrleistung gewichtete Artemisverbrauch** mit dem Zertifizierungsverbrauch in Bezug gesetzt, kann näherungsweise (ohne transiente Effekte) der Einfluss der Fahrleistungsverteilung auf die verschiedenen Varianten beurteilt werden. Die Tabelle 6-1 gibt den relativen Mehrbedarf basierend auf einer gewichteten Kombination der Artemisprofile Innerorts, Außerorts und Autobahn gegenüber dem Zertifizierungszyklus NEFZ für die unterschiedlichen Fahrzeugsegmente und Antriebsvarianten wieder.

Tabelle 6-1 Vergleich des Mehrbedarfs Artemis kombiniert gegenüber dem NEFZ-Verbrauch

Artemis kombiniert vs. NEFZ-Verbrauch	BEV	FC-REEV	FC-PHEV	FCEV	ICE-G-Fahrzeug	ICE-D-Fahrzeug
Segment 1	24,6 %	26,0 %	33,8 %	21,4 %	13,2 %	15,1 %
Segment 2	27,7 %	28,7 %	27,0 %	22,2 %	12,4 %	12,8 %
Segment 3	27,0 %	27,5 %	24,9 %	18,2 %	26,8 %	10,8 %

Für das BEV liegt der zusätzliche Energieverbrauch zwischen 24,6 % und 27,7 %, bei dem FC-REEV zwischen 26,0 % und 28,7 % und bei dem FC-PHEV zwischen 33,8 % und 24,9 %. Bei dem reinen Brennstoffzellenfahrzeug fällt der relative Mehrbedarf etwas geringer aus und beläuft sich, je nach Segment, auf 18,2 % bis 22,2 %. Die niedrigere, relative Verbrauchssteigerung resultiert aus einem höheren, absoluten Zertifizierungsverbrauch. Die beiden konventionellen Antriebsarten weisen ebenfalls einen

niedrigeren prozentualen, zusätzlichen Energiebedarf auf. Dieser sinkt für das Dieselfahrzeug von dem ersten zu dem dritten Segment von 15,1 % auf 10,8 %. Bei dem Benzinfahrzeug sinkt der Mehrbedarf von der ersten auf die zweite Fahrzeugklasse ebenfalls. Die relative Verbrauchssteigerung reduziert sich von 13,2 % auf 12,4 %. In der größten Fahrzeugvariante steigt das Verhältnis, entgegen der Erwartung, deutlich an. Der hier festgestellte, hohe relative Mehrbedarf resultiert hauptsächlich aus einem vergleichsweise geringen NEFZ-Verbrauch (vgl. Abbildung 6-2 c)) und einem hohen, relativen Mehrbedarf in dem Innerortszyklus (160 % in dem Vergleich zu dem Zertifizierungsbedarf). Der hohe Verbrauchswert des Innerortsprofils beruht auf ineffizienten Lastpunkten und vielen Standphasen ohne eine Möglichkeit der Nutzung der Start-Stopp-Automatik, basierend auf einem dauerhaft kalten Motor während eines einmaligen Durchfahrens des Zykluses. In dem Vergleich dazu wird in dem NEFZ der Motor während des Fahrprofils warm und die Start-Stopp-Automatik kann teilweise ausgenutzt werden. Zudem sind die Verbrauchswerte der Lastpunkte in dem Zertifizierungszyklus merklich verbrauchsgünstiger. Der simulierte, optimistische Energiebedarf des ICE-G-Fahrzeugs des dritten Segments stellt, wie in dem übernächsten Abschnitt diskutiert, eine Ausnahme dar, vgl. dazu Abbildung 6-2 c) auf der Seite 164.

Werden die **Segmente** einzelner Antriebsvarianten in Relation zueinander betrachtet, wird deutlich, dass die Ausführungen der Fahrzeuge der Oberklasse den höchsten und Fahrzeuge der Klein- und Kleinstwagenklasse den niedrigsten Energiebedarf erzielen. Die Unterschiede des Verbrauchs basieren dabei auf den verschiedenen Fahrwiderständen und Auslastungen der Antriebssysteme. Bemerkenswert ist, dass der Anstieg der benötigten Energiemenge für 100 km Innerorts deutlich stärker als in dem Autobahnprofil ausfällt. Der beschriebene Effekt resultiert aus den korrespondierenden Lastkollektiven der Zyklen und den unterschiedlichen Fahrwiderständen der Segmente. Für leistungsstärkere Verbrennungs- oder Elektromotoren sind die Betriebspunkte des Innerortsfahrprofils aufgrund eines vermehrten Anteils in dem Teillastbereich ineffizienter, während die Lastpunkte in dem Autobahnzyklus teilweise in effizienteren Bereichen fahrbar sind. Zudem ist der Einfluss der verschiedenen Fahrwiderstände zwischen den Zyklen unterschiedlich. Wie in der Abbildung 2-5 auf der Seite 16 beispielhaft gezeigt, überwiegt bei hohen Geschwindigkeiten der Luftwiderstand. Darauf basierend folgt, dass dieser in dem Autobahnzyklus eine dominantere Rolle, als in dem Innerortsprofil, innehat. Der vorteilhafte c_w -Wert der höheren Segmente hat somit einen erhöhten Einfluss auf Fahrten auf der Autobahn. Der Anstieg der Verbrauchswerte fällt deshalb geringer aus.

Für eine Verifizierung der ermittelten Energiebedarfswerte der Zertifizierungszyklen der verschiedenen Segmente sind diese in der Abbildung 6-2 **realen Verbrauchsangaben** aus [38] gegenübergestellt. Für die erste Fahrzeugklasse sind in dem Balkendiagramm a) zertifizierte Batteriefahrzeuge und konventionelle Benzin- und Dieselfahrzeuge herausgearbeitet. In der Darstellung b) sind die simulierten Werte der Varianten der Mittelklasse für die gleichen Antriebsarten und zusätzlich für Brennstoffzellenfahrzeuge visualisiert. In der Abbildung c) ist der Vergleich für das dritte Segment anhand der Fahrzeugvarianten des ersten Segments dargestellt. Sowohl in der Klein- und Kleinstfahrzeugklasse als auch in dem zweiten Segment liegen die Verbrauchswerte, wie zu erwarten, inmitten der realen Angaben. Die simulierten Energiebedarfe des Zertifizierungszyklus spiegeln somit ein durchschnittliches Fahrzeug des jeweiligen Segments und Antriebs gut wider. Für die dritte Fahrzeugklasse ist dies ebenfalls für das Dieselfahrzeug zutreffend. Bei dem BEV und bei dem ICE-G-Fahrzeug sind die simulierten Verbrauchsangaben in dem NEFZ in dem Vergleich zu den realen Werten niedrig. Für das BEV resultiert dies durch einen monotonen Vergleich mit ausschließlich Fahrzeugen der Firma Tesla Inc. Diese sind ausgenommen in der Oberklasse angesiedelt und repräsentieren somit nur diese Fahrzeugklasse. Folglich ist eine größere Batteriekapazität verbaut, was wiederum eine erhöhte Fahrzeugmasse impliziert. Aus einer erhöhten Gesamtmasse abgeleitet, ergibt sich ein höherer Energiebedarf. Die Abweichung des Verbrauchswerts des BEVs des dritten Segments ist somit erklärbar. Für das Benzinfahrzeug der gleichen Fahrzeugklasse zeigt sich, dass dessen Energiebedarf in dem Vergleich zu den Realangaben einen niedrigen Verbrauchswert erzielt. Dies liegt, unter anderem, an den Fahrzeugeigenschaften des gemittelten Segments und dem verwendeten Motorkennfeld. Die Ergebnisse des Fahrzeugs mit einem Ottomotor in der Fahrzeugklasse groß sind somit optimistisch und sind deshalb kritisch zu bewerten.

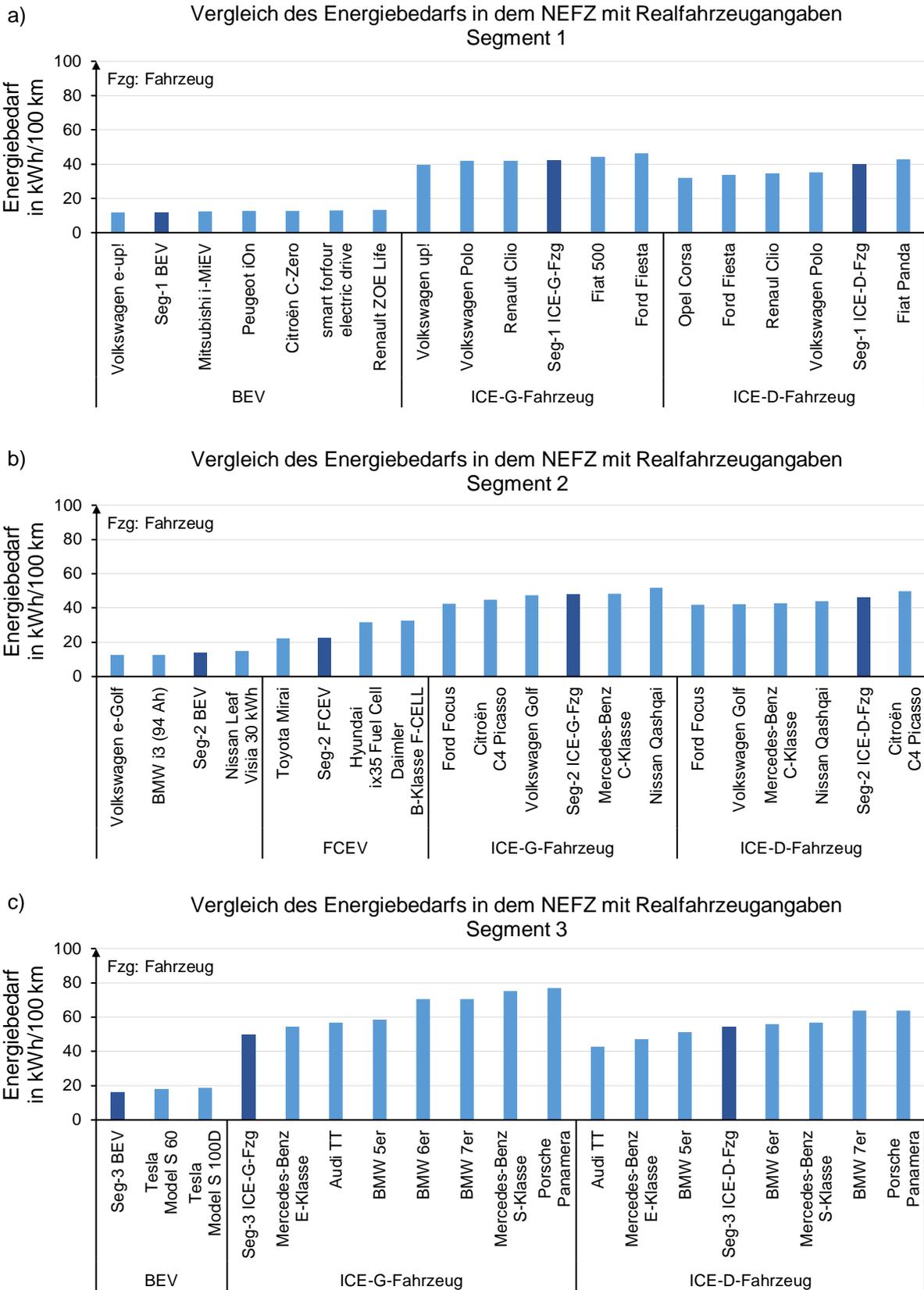


Abbildung 6-2 Vergleich des Energiebedarfs in dem NEFZ mit Realfahrzeugangaben a) Segment 1, b) Segment 2 und c) Segment 3; Fahrzeugangaben der Realfahrzeuge siehe Anhang 20, Anhang 21 und Anhang 22; Daten aus [38]

6.1.2 Wetter- und Startbedingungen

Nachdem der Einfluss unterschiedlicher Fahrzyklen auf die analysierten Antriebsstrangvarianten durchgeführt wurde, wird folgend der Effekt der Nebenverbraucher in europäischen Regionen untersucht. Dazu werden die drei Fahrzeugklassen unter typisch deutschen, spanischen und norwegischen Klimarandbedingungen betrachtet. Die dazu notwendigen Umwelteinflüsse werden mittels der in dem Kapitel 3.1.3 beschriebenen Methodik eruiert. In dem ersten Unterpunkt dieses Abschnitts wird detailliert auf saisonale Effekte, basierend auf deutschen Wettereigenschaften und unterschiedlichen Fahrzyklen und unterschiedlichen Fahrtlängen, eingegangen. Dabei wird der durchschnittliche Verbrauch pro einhundert Kilometer für die Jahreszeiten Winter, Frühling, Herbst und Sommer dediziert evaluiert, indem die gewichteten Energiebedarfe zueinander in Relation gesetzt und der unterschiedliche Einfluss verschiedener Streckenprofile und verschiedene Streckendistanzen analysiert werden. Nach einer Betrachtung für deutsche Klimarandbedingungen erfolgt eine analoge Untersuchung für die Regionen Spanien und Norwegen, um den Einfluss eines warmen und eines kalten europäischen Klimas abzubilden. Darauf folgend werden verschiedene Startbedingungen analysiert und abschließend der Einfluss variabler Wetterbedingungen beispielhaft anhand der Klimaregion Deutschland bewertet.

Für die initialen Rahmenbedingungen werden Definitionen getroffen, um die hohe Variantenvielfalt und Simulationsdauer zu bewältigen. Insgesamt werden sechs Antriebsvarianten, drei Segmente, drei Länder, drei Fahrprofile, fünf Startzeiten, vier Jahreszeiten à fünf Wetterbedingungen, drei Parksituationen, zwei Untersuchungsjahre betrachtet und Konfigurationen mit nur einem Energiewandler eine Stunde und Aufbauten mit zwei Energiewandlern bei Bedarf zwei Stunden simuliert. Für eine detaillierte, länderspezifische Analyse wird deshalb als Ausgangsprämisse angenommen, dass aufladbare Antriebsvarianten vor jeder Fahrt nahezu vollständig geladen sind. Für die Verrechnung jener, über eine Fahrt aus dem Batteriesystem entnommenen, Lademenge erfolgt eine Division mit 0,85, um einen Ladewirkungsgrad von 85 % zu berücksichtigen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass alle Fahrten mit dem Ausgangszustand „Aufgeheizt“ gefahren werden. Dies wird vollzogen, da der Unterschied des Energiebedarfs gemittelt über die verschiedenen Startsituationen zwischen der Parksituation „Schatten“ und „Aufgeheizt“, wie anschließend in dem Unterkapitel 6.1.2.3 gezeigt, einen geringen Einfluss auf die durchschnittlichen Verbrauchswerte aufweist. Zudem wird für das Betrachtungsjahr 2015 die Annahme getroffen, dass ein vorgeheizter Zustand selten auftritt und somit vernachlässigt werden kann.

Für eine Ermittlung der durchschnittlichen Verbräuche für längere, als durch die Simulation abgedeckte, Fahrzeiten, oder in dem Fall einer leeren Batterie bei einem rein batteriebetriebenen Automobil, wird für Fahrzeuge mit nur einem Energiewandler angenommen, dass jener nach einer Stunde ermittelte, durchschnittliche Verbrauch als nahezu konstant betrachtet werden kann. Dies wird dadurch begründet, dass der transiente Verlauf der Nebenverbraucher bereits eingeschwungen ist und die Antriebskomponenten ihre nominellen Arbeitspunkte ausreichend lange erreicht haben. Bei den Antriebsvarianten mit zwei Energiewandlern wird vorausgesetzt, dass bis zu einem, in dem Kapitel 5 beschriebenen, definierten Mindestladezustand in dem CD-Modus gefahren wird. Erst folgend wird der CS-Betrieb angewandt. Werden in diesem Zusammenhang Fahrscenarien gefahren, in welchen die reine Batteriereichweite nicht ausreichend ist, wird die Fahrzeugnutzung für zwei Stunden simuliert. Für eine Abbildung einer längeren Fahrstrecke wird der eingeschwungene Verbrauchswert des sekundären Energiewandlers genutzt. Dies trifft beispielsweise bei einem FC-PHEV-Fahrzeug des zweiten Segments in dem Außerortszyklus zu. Hierbei erfolgt die Umschaltung auf den CS-Modus bei ca. 48 km, vgl. Abbildung 6-7 auf der Seite 173. Der über den letzten kompletten Zyklusabschnitt benötigte Energiebedarf des sekundären Energiewandlers wird in das Verhältnis zu dem bisherigen Verbrauch gesetzt, um den weiteren Verlauf des durchschnittlichen Energiebedarfs zu approximieren. Die Gewichtung der Verbrauchswerte erfolgt dabei mittels der gefahrenen Kilometer je Betriebsmodus.

6.1.2.1 Saisonaler Energiebedarf in Deutschland

Der Einfluss des saisonalen Energiebedarfs in Deutschland wird anhand der Abbildung 6-6 auf der Seite 172 für den Innerorts-, anhand der Abbildung 6-7 auf der Seite 173 für den Außerorts- und anhand der Abbildung 6-8 auf der Seite 174 für den Autobahnzyklus analysiert. In jeder Darstellung werden die verschiedenen Antriebsvarianten gegenübergestellt. In den Diagrammen sind jeweils die Angaben des durchschnittlichen Energieverbrauchs pro einhundert Kilometer für die vier meteorologischen Jahreszeiten, Winter, Frühling, Sommer und Herbst, enthalten. Dabei wird in den Diagrammen a), b), c), d), e) und f) immer ein reines Batterie-, ein Brennstoffzellen-Range-Extender-, ein Brennstoffzellen-Plug-In-, ein Brennstoffzellenfahrzeug, eine Antriebsvariante mit einem Ottomotor und ein Automobil mit einem Dieselmotor des zweiten Segments dargestellt. Die Ergebnisse des ersten und des dritten Segments sind in dem Anhang 23 bis zu dem Anhang 28 zu finden. Bei der durchgeführten Ermittlung der Ergebnisse erfolgte die Gewichtung der einzelnen Tageszeiten anhand der in dem Kapitel 3.1.3 beschriebenen Fahrleistung je Zeitcluster.

Werden die Ergebnisse der **Zyklen** unabhängig der saisonalen Bedingungen betrachtet, werden periodisch wiederkehrende, abnehmende Schwankungen des durchschnittlichen Verbrauchswerts festgestellt. Diese repetierenden Änderungen sind systematisch und beruhen auf der Methodik der Erstellung des Zyklusprofils für eine Simulationsdauer von einer Stunde bzw. von zwei Stunden. Bei der Anfertigung des Geschwindigkeitsprofils wird jeweils ein Artemiszyklus solange seriell hintereinander gereiht, bis die geforderte Fahrtendauer erreicht wird. Aus diesem Vorgehen resultierend, treten zyklusbedingte Schwankungen wiederholt auf, beispielsweise ein initiales Anfahren oder ein finales Abbremsen des Zyklus. Vor allem in dem Innerortsprofil der Varianten mit einem Verbrennungsmotor, Diagramme e) und Diagramm f) der Abbildung 6-6), wird bei etwa vier, bei etwa acht und bei etwa zwölf Kilometern ein Anstieg festgestellt. Besonders bei einer Fahrstrecke von ca. vier Kilometern ist die Zunahme deutlich. Die ausgeprägte Änderung des durchschnittlichen Energiebedarfs zu diesem Zeitpunkt beruht auf Standphasen, in welchen die Start-Stopp-Automatik noch nicht aktiv ist. Während des stattfindenden Stopps wird der Motor in dem Leerlauf betrieben und der durchschnittliche Verbrauchswert steigt signifikant an. Neben dem wiederkehrenden, systematischen Effekt des Geschwindigkeitsprofils, wird allgemein festgestellt, dass der Einfluss der Nebenverbraucher in dem Innerortsprofil am stärksten und bei einer Autobahnfahrt am schwächsten ist. Diese Feststellung lässt sich mit der durchschnittlichen Geschwindigkeit, dem zyklusbedingten Energiebedarf für die Fahrwiderstände und dem daraus resultierendem Anteil der Nebenverbraucher erklären. Da beispielsweise die initiale Leistungsaufnahme der zusätzlichen Verbraucher für die Klimatisierung der Fahrgastzelle nahezu unabhängig der Fahrstrecke ist, wird der benötigte Energiebedarf in dem Innerortszyklus auf eine reduzierte Anzahl an gefahrenen Kilometer verrechnet. Diese Aufteilung auf die Fahrlänge führt unweigerlich dazu, dass der durchschnittliche Verbrauch pro einhundert Kilometer in dem Innerortsfahrprofil stärker beeinflusst wird. Neben der geringen Fahrstrecke des innerstädtischen Geschwindigkeitsprofils spielen die zyklusbedingten Fahrwiderstände ebenfalls eine wichtige Rolle. In dem Autobahnfahrprofil wird beispielsweise ein höherer Energiebedarf benötigt, was wiederum dazu führt, dass der relative Anteil der Nebenverbraucher an dem gesamten Kraftstoffbedarf reduziert wird. Resultierend ist der relative Einfluss der zusätzlichen Leistungskonsumenten in dem Innerortsfahrzyklus am höchsten und in dem Autobahnzyklus am niedrigsten. Basierend auf der markantesten Ausprägung, wird die Untersuchung der unterschiedlichen Energiebedarfe der meteorologischen Jahreszeiten folgend anhand des Fahrprofils Innerorts diskutiert.

Wird der **Effekt der saisonalen Bedingungen** untersucht, wird festgestellt, dass jeweils die in Blau visualisierte Linie jene des höchsten Energiebedarfs ist. Diese repräsentiert die meteorologische Jahreszeit Winter. Die ermittelten, hohen Verbrauchswerte resultieren aus kalten Start-, aus kalten Komponenten- und aus kalten Umgebungsbedingungen. Diese implizieren einen hohen Heizbedarf, ineffiziente Komponenteneigenschaften, hohe Fahrwiderstände (Roll- und Luftwiderstand) und aufgrund der niedrigen Temperatur bzw. der hohen Nebenverbraucherleistungen angepasste Betriebsmodi (beispielsweise keine Start-Stopp-Automatik-Funktion oder eine erhöhte Leerlaufdrehzahl). Wird der Frühling, die grüne Linie, und der Herbst, die braune Linie, betrachtet, wird festgestellt, dass der Energiebedarf der

beiden Jahreszeiten, aufgrund ähnlicher Rahmenbedingungen, vergleichbar ist. Die ermittelten Werte in dem Herbst liegen etwas über den Werten des Frühlings. Die beiden simulierten Energiebedarfswerte sind in den meisten Betrachtungsszenarien permanent höher als die Verbrauchswerte des Sommers. Dieses, aufgrund eines teilweise intensiven Einsatzes der Klimaanlage in dem Sommer, unerwartete Resultat lässt sich über die folgende Überlegung erklären. Bei einem absolut betrachteten, gleichen thermischen Energiebedarf, beispielsweise bei einer Klimatisierung einer Fahrgastzelle, lässt sich eine Kühlung durch die Ausnutzung des Kältemittelkreislaufs effizienter realisieren als eine Heizung mittels eines elektrischen Zuheizers, vgl. dazu Kapitel 2.6.3 der theoretischen Grundlagen. Zudem wird bei der Betrachtung des saisonalen Energiebedarfs ein, über die gesamte Jahreszeitdauer und den gesamten Tag, gemittelter Verbrauchswert betrachtet. Dieser enthält, anteilig der Fahrleistung, den Einfluss der unterschiedlichen Startzeiten und Wetterbedingungen. So wird beispielsweise in dem Sommer in morgendlichen Fahrten keine, oder nur eine geringere Heizleistung benötigt, während diese in dem Frühling oder in dem Herbst bereitgestellt werden muss. Zudem tritt ein hoher Kühlbedarf aufgrund des geringen Anteils der sehr heißen Fahrten in dem Sommer nur sporadisch auf. Subjektiv betrachtet werden besondere Eigenschaften jedoch tendenziell überbewertet, indem sie auf faktisch unabhängige, nicht bekannte oder mäßig korrelierende Eigenschaften übertragen werden. Diese kognitive Verzerrung wird in der Sozialpsychologie Halo-Effekt genannt [218]. Auf den „Extremsommer“-Anteil bezogen bedeutet dies, dass dieser aufgrund seiner besonderen Eigenschaften teilweise überbewertet wird. Lediglich für die Antriebsstrangvarianten FCEV, ICE-G- und ICE-D-Fahrzeug in dem Innerortsfahrprofil sind die Verbrauchswerte des Sommers ab ca. acht bis ca. zwölf Kilometern höher als die Ergebnisse in dem Frühling bzw. in dem Herbst. Diese Gegebenheit resultiert aus einer, zu unterschiedlichen Zeitpunkten verfügbaren und nutzbaren, Abwärme der Energiewandler in dem Frühling bzw. in dem Herbst gegenüber dem Sommer und einer gleichzeitigen, sehr hohen Relevanz der Nebenverbraucher in dem Innerortsfahrprofil. In dem Außerorts- und in dem Autobahnzyklus wird diese Eigenschaft durch die in dem Sommerintervall geringeren Fahrwiderstände und den relativen Anteil der Nebenverbraucher in dem jeweiligen Fahrprofil überkompensiert. Besonders der Einfluss der Luftdichte ist hierbei erwähnenswert. Die Abbildung 6-3 a) visualisiert diese in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur für eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % und einem konstanten Umgebungsdruck von 1 bar. Die Luftdichte geht direkt proportional in den Luftwiderstand ein, vgl. dazu Gleichung 2-3 auf der Seite 15, und ändert sich von -20 °C auf +30 °C bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit und einem Norm-Luftdruck von 1,013 bar von ca. 1,394 kg/m³ auf ca. 1,155 kg/m³. Dies entspricht einer relativen Änderung von 17,14 %. Neben der Temperatur beeinflusst die Luftfeuchtigkeit ebenfalls die Luftdichte. Diese hat in dem Vergleich zu der Temperatur einen nicht so stark ausgeprägten Einfluss und ist deshalb nicht dargestellt.

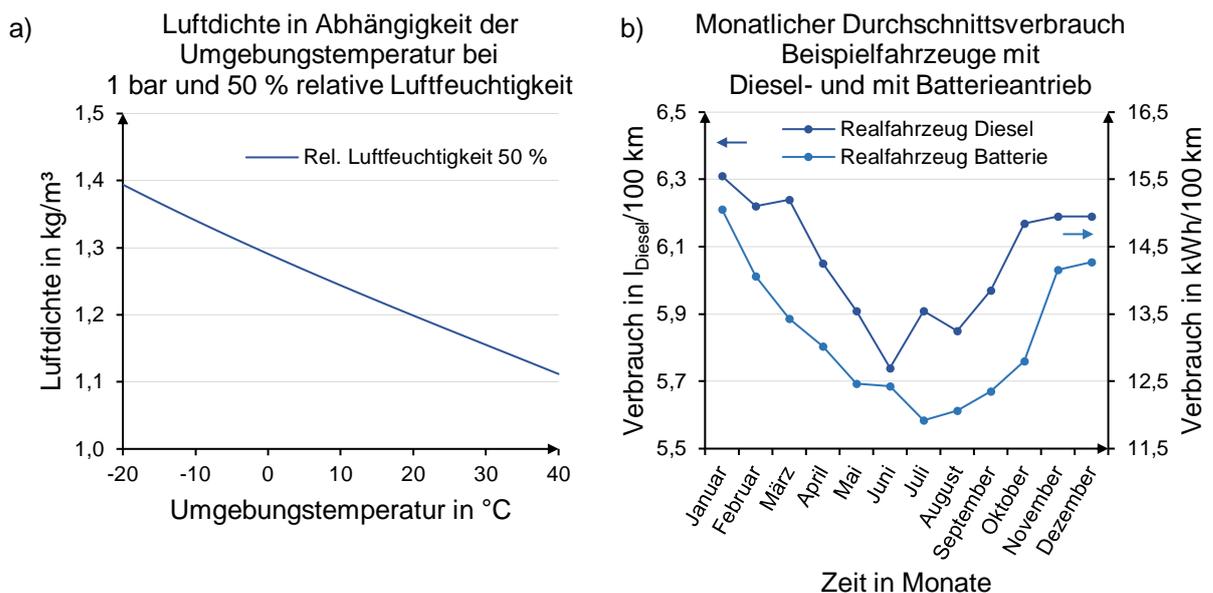


Abbildung 6-3 a) Luftdichte in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und b) monatlicher Durchschnittsverbrauch realer Fahrzeuge mit einem Diesel- und mit einem Batterieantrieb, Daten aus [219]

Durch eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 99,5 km/h ist besonders in dem Autobahnzyklus der Effekt einer reduzierten Luftdichte aufgrund eines hohen Anteils des Luftwiderstands signifikant. Wird beispielsweise der Energiebedarf des Luftwiderstands eines Fahrzeugs der Mittelklasse bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C mit jenem bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C verglichen, wird eine Reduzierung um 12,2 % festgestellt. Bei einer Geschwindigkeit von 99,5 km/h werden allein darauf basierend etwa 1,15 kWh pro einhundert Kilometer weniger für die Überwindung der Fahrwiderstände benötigt. Wird die verringerte Energiemenge mit den Wirkungsgraden der Antriebsstrangkette verrechnet, kann der Effekt einer höheren Nebenverbraucherleistung in dem kalten Szenario überkompensiert werden. Die Abbildung 6-3 b) zeigt den durchschnittlichen Verbrauch anhand von zwei realen Fahrzeugen mit einem Diesel- und mit einem Batterieantrieb aufgelöst in Monaten aus der Datenbank [219]. Anhand des monatlichen Verlaufs und dem gleichen, saisonalen Verhalten, werden die festgestellten Simulationsergebnisse als valide bezeichnet und der festgestellte Einfluss der Nebenverbraucher bestätigt.

Wird der **Verlauf des durchschnittlichen Energiebedarfs** für Antriebe mit einem Energiewandler betrachtet, ist erkennbar, dass dieser gegen einen nahezu konstanten Endwert konvergiert. Der beschriebene Grenzwert ergibt sich, indem der Einfluss lokaler Eigenschaften der Zyklen, wie beispielsweise rapide Änderungen der Geschwindigkeit und Standphasen, abnimmt und der Leistungsbedarf der Nebenverbraucher eingeschwungen ist. Die Abbildung 6-4 a) bzw. b) stellt den transienten Verlauf der Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher für eine Fahrt in dem Winter an dem Morgen für ein Fahrzeug mit einem Benzinmotor bzw. für eine Sommerfahrt an dem Nachmittag für ein Batteriefahrzeug des zweiten Segments dar. In den beiden Diagrammen ist jeweils der Energiebedarf für die Klimatisierung der Fahrgastzelle für das Aufwärmen bzw. für das Abkühlen dieser dominant. Die zunächst hohe Heiz- bzw. hohe Kühlleistung resultiert aus den kalten bzw. den warmen Startbedingungen bei dem jeweiligen Antritt der Fahrt und einem, aus einem hohen Komfort- und aus einem hohen Sicherheitsanspruch abgeleiteten, Bestreben eines zeitnahen Einstellens einer Solltemperatur. Verringert sich die Regeldifferenz während der Fahrt, oder hat in einem Heizfall der Kühlkreislauf des Verbrennungs- oder des Brennstoffzellensystems ein ausreichend hohes Temperaturniveau für die Klimatisierung der Fahrgastzelle erreicht, beispielsweise in der Abbildung 6-4 a) nach ca. acht Minuten, reduziert sich die zusätzliche Leistungsaufnahme der Nebenverbraucher. Ist die Komforttemperatur erreicht, wird lediglich ein thermisches Gleichgewicht der Wärmezu- und der Wärmeabfuhr gehalten. Folglich stellen sich eine nahezu konstante Leistungsanforderung der Nebenverbraucher und ein nahezu konstanter Durchschnittsverbrauch ein.

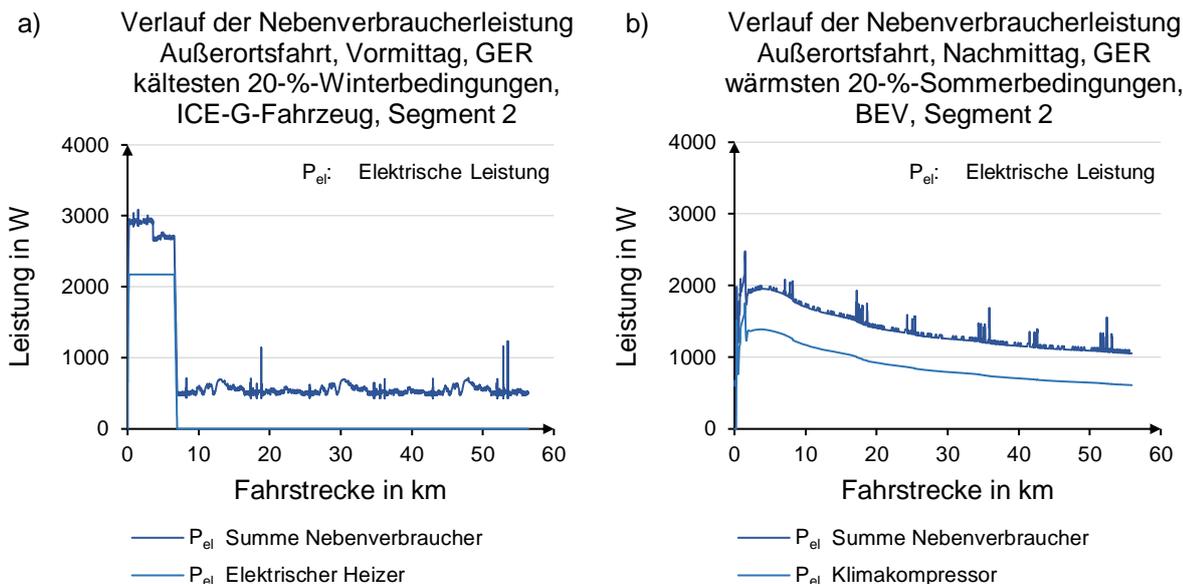


Abbildung 6-4 Verlauf der Nebenverbraucherleistung in dem Segment 2 in dem Außerortszyklus für a) Vormittag, GER, kältesten 20%-Winterbedingungen, ICE-G-Fahrzeug und b) Nachmittag, GER, wärmsten 20%-Sommerbedingungen, BEV

Wird der Energiebedarf von Fahrzeugen mit zwei Energiewandlern, beispielsweise von einem FC-PHEV und von einem FC-REEV, analysiert, wird für die Varianten des zweiten Segments festgestellt, dass beide Antriebsvarianten in dem Autobahnzyklus und nur der FC-PHEV in dem Außerortsprofil nach einer Einschwingphase einen wieder ansteigenden, durchschnittlichen Verbrauchswert aufweisen. Die erneute Erhöhung des Verbrauchswerts resultiert aus einem Wechsel der Betriebsstrategie. In diesem Fall wird von einem reinen Batteriebetrieb, Charge Depleting-Modus, auf einen kombinierten Betrieb, Charge Sustaining-Modus, umgeschaltet. Nach einem Wechsel der Betriebsstrategie wird der zweite Energiewandler, welcher eine niedrigere Systemeffizienz aufweist, überwiegend betrieben. Resultierend steigt sowohl der momentane als auch der durchschnittliche Energiebedarf an. Letzterer erhöht sich in dem Verhältnis der mit den jeweiligen Energiewandlern gefahrenen Kilometern. Würde beispielsweise die Fahrtdauer in dem CS-Modus gegen unendlich konvergieren, würde der durchschnittliche Energiebedarf gegen den Verbrauchswert in dem CS-Betrieb konvergieren. Der Umschaltzeitpunkt der Betriebsstrategie erfolgt für die FC-REEV-Variante des zweiten Segments bei ca. 48 km, während dies bei dem FC-PHEV bei etwa 30 km auf der Autobahn und bei etwa 48 km in dem Außerortsprofil stattfindet. Die unterschiedlichen Zeitpunkte des Wechsels der Betriebsstrategie beruhen auf verschiedenen Fahrwiderständen und verschiedenen Komponentenauslegungen, beispielsweise einer deutlich abweichenden Batteriegröße. Während bei dem FC-PHEV der Mittelklasse 8,6 kWh verbaut sind, ist die FC-REEV-Variante mit 14,9 kWh ausgestattet. Obwohl das Fahrzeug mit einem Range-Extender ein, um den Faktor 1,7, größeres Batteriesystem besitzt, wird aufgrund eines früheren Eintretens des CS-Modus in dem Autobahnprofil lediglich eine 1,6-fache Reichweite rein batterieelektrisch zurückgelegt. Ein zeitlich früheres Aktivieren der CS-Funktion ist für einen, wie in dem Kapitel 5.2.1 beschriebenen, ausgelegten, FC-REEV essenziell, um temporär länger anhaltende hohe Geschwindigkeiten zu absolvieren.

Wird der Fokus der Untersuchung auf den **relativen Einfluss der Nebenverbraucherleistung** gelegt, wird festgestellt, dass dieser in dem Vergleich der verschiedenen Antriebsvarianten und der verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Besonders bei alternativen Antrieben ist dieser aufgrund eines niedrigen Tank-to-Wheel-Energiebedarfs bzw. aufgrund einer hohen Antriebsstrangeffizienz und einem modifizierten Thermomanagement merklich. Vor allem bei BEVs und in dem reinen Batteriebetrieb der FC-REEVs und der FC-PHEVs ist der Effekt prägnant. Die Abbildung 6-5 auf der Seite 171 visualisiert den Energiebedarf eines Mittelklassefahrzeugs mit Nebenverbraucher bezogen auf einen Verbrauch ohne Nebenverbraucher, bei 25 °C Umgebungstemperatur, um den transienten Einfluss der Nebenverbraucherleistung einfach zu bewerten. In den Diagrammen ist der Verbrauchswert pro einhundert Kilometer aller Antriebsvarianten für die Momentaufnahme bei 10 Minuten, 30 Minuten und 60 Minuten für alle vier Jahreszeiten gegenübergestellt. Das Diagramm a) zeigt den Einfluss in dem Innerortsprofil, das Diagramm b) jenen des Außerortszyklus und das Diagramm c) jenen einer Autobahnfahrt. An den jeweiligen Achsen der drei Diagramme ist feststellbar, dass der Anteil an dem Energiebedarf der Nebenverbraucher in dem Innerortsfahrprofil am signifikantesten ausfällt. Des Weiteren ist ein abklingender Einfluss des zusätzlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke für fast alle Antriebsvarianten zu erkennen. Einzig der FC-PHEV zeigt in dem Außerortszyklus bei 60 Minuten Fahrtdauer ein ausgeprägtes, abweichendes Verhalten. Diese Anomalie ist mit der angewandten, auf dem SOC basierenden, Betriebsstrategie zu erklären. Bei der Fahrt mit der Berücksichtigung der Nebenverbraucher tritt der Wechsel in den CS-Modus vor der letzten Momentaufnahme auf, während dieser ohne einem zusätzlichen Leistungsbedarf erst später erfolgt. Folglich wird ein erhöhter Energiebedarf mit einem reinen CD-Verbrauch in Bezug gesetzt und die relative Abweichung steigt wieder an. Der höchste Einfluss der Nebenverbraucher ist in dem Winter in dem Innerortsfahrprofil feststellbar. Bei den alternativen Antrieben liegt der relative Verbrauchswert nach zehn Minuten bzw. knapp drei Kilometern bei ca. 220 %, während dieser bei den konventionellen Varianten ca. 150 % beträgt. Mit einer gesteigerten Fahrtdauer und einer gesteigerten Fahrstrecke nimmt der zusätzliche Energiebedarf aufgrund des Einschwingvorgangs und der Erwärmung der Antriebskomponenten ab. Während die rein über den CD-Modus betriebenen Antriebsvarianten nach 60 Minuten und knapp 18 km immer noch ein Verhältnis der Verbrauchswerte von ca. 190 % aufweisen, reduziert sich dieses bei dem FCEV auf 140 % und bei den

ICE-Varianten auf ca. 120 %. Die starke Reduktion der letztgenannten Varianten basiert auf einer Ausnutzung der Abwärme und einer damit verbundenen Erhöhung der Gesamteffizienz. Das Verhalten des Energiebedarfs mit Nebenverbraucher ist in den Jahreszeiten Frühling und Herbst über der Fahrstrecke vergleichbar. Dieses liegt, aufgrund eines geringeren Heizbedarfs, auf einem, in dem Vergleich zu dem Winter, niedrigerem Niveau. Nach zehn Minuten in dem Innerortsprofil werden bei den alternativen Antrieben in dem Frühling etwa 150 % und in dem Herbst etwa 160 % ermittelt. Bei beiden konventionellen Fahrzeugen ist der Einfluss deutlich geringer. Der Verbrauchswert mit zusätzlicher Leistungsaufnahme liegt für diese Varianten bei etwa 120 %. Während der Fahrt sinkt das Verhältnis der Energiebedarfe weiter ab, da in kalten Fällen die Abwärme der Antriebe FCEV, ICE-G- und ICE-D-Fahrzeug ausgenutzt oder in warmen Situationen der Sollzustand der Kabinenklimatisierung erreicht wird. Nach 60 Minuten liegt der Energiebedarf mit Nebenverbrauchern für das BEV-, FC-PHEV- und FC-REEV bei ca. 140 %, während dieser für das FCEV etwa 125 % aufweist und für die beiden konventionellen Varianten ca. 115 % erreicht. In dem Sommer fällt der zusätzliche Energiebedarf, wie vorab diskutiert, in dem Durchschnitt am geringsten aus. Bei den alternativen Antrieben liegt der Mehrbedarf in dem Innerortsprofil anfänglich bei ca. 30 %. Während der Fahrt reduziert sich der Einfluss marginal und erreicht etwa 25 %. Der relative Effekt der zusätzlichen Leistungsverbraucher ist für die beiden konventionellen Fahrzeuge aufgrund eines erhöhten Basisbedarfs niedriger. Nach etwa zehn Minuten werden nur ca. 10 % mehr Energie benötigt. In dem Gegensatz zu den anderen Antriebsstrangvarianten steigt der Mehrbedarf über der Fahrstrecke an und erreicht final ca. 15 %. Die Besonderheit eines erneuten Anstiegs resultiert aus den Prämissen der eingebauten Start-Stopp-Automatik. Während diese nach ca. zehn Minuten für beide Szenarien inaktiv ist, erfolgt eine Aktivierung bei der Betrachtung ohne Nebenverbraucher früher. Während den Standphasen kann somit Energie eingespart werden und der Energiebedarf der Fahrt ohne Nebenverbraucher sinkt in dem Vergleich zu aktiven Nebenverbraucher über der Fahrstrecke stärker ab. Außerorts zeigt sich in dem Allgemeinen ein ähnliches Verhalten, allerdings mit einem reduzierten, relativen Einfluss. Hier sticht lediglich der oben beschriebene Sonderfall des FC-PHEVs heraus. In dem Autobahnzyklus fällt der deutlich geringere Anteil des zusätzlichen Energiebedarfs und generell der Sommerverbrauch nach 60 Minuten auf. Die Reduzierung des Verhältnisses der Verbrauchswerte basiert auf einem höheren Energiebedarf des Fahrzykluses ohne Nebenverbraucher durch erhöhte Fahrwiderstände. Der Mehrbedarf des Sommers ist für die alternativen Antriebsvarianten BEV, FC-PHEV und FCEV niedriger als jener der Fahrzeuge mit einem konventionellen Antrieb und jener des FC-REEV-Derivats. Der erhöhte Verbrauch des Letztgenannten ist mit dem Aktivierungszeitpunkt der Betriebsstrategie „Charge Sustaining“ erklärbar. Der Wechsel des Betriebsmodus tritt bei einer Berücksichtigung der Nebenverbraucher früher ein und erhöht das Verbrauchsverhältnis aufgrund der unterschiedlichen Systemeffizienzen. Die Differenz der anderen alternativen Antriebsvarianten zu den konventionellen Varianten lässt sich mit der Wirkungsgradkette der Antriebsstränge und dem bereits beschriebenen Einfluss der Luftdichte erklären. Basierend auf einem reduzierten Luftwiderstand sind die Fahrwiderstände bei wärmeren Bedingungen niedriger, vgl. Abbildung 6-3 b). Die reduzierte Leistung für eine Überwindung der Fahrwiderstände, aufzubringen über die Räder, wird bei alternativen Antrieben mit den Wirkungsgraden des Differenzialgetriebes, des Getriebes, des Elektromotors und des Inverters verrechnet und erst anschließend zusammen mit der Leistungsanfrage der Nebenverbraucher von dem Batteriesystem bzw. dem Brennstoffzellensystem zu der Verfügung gestellt. Bei konventionellen Antriebssträngen wird eine verringerte Nettoleistung lediglich mit den Wirkungsgraden des Differenzialgetriebes und des Getriebes erhöht, bevor diese, zusammen mit dem zusätzlichen Leistungsbedarf, von einem Verbrennungsmotor zu der Verfügung gestellt wird. Da der Nettomehrbedarf der Klimatisierung identisch ist, wirkt sich eine Reduzierung des Leistungsbedarfs der Fahrwiderstände für die alternativen Antriebsvarianten stärker aus. Das geringe Verhältnis des Energiebedarfs für die Antriebstypen BEV, FC-PHEV und FCEV ist somit erklärbar.

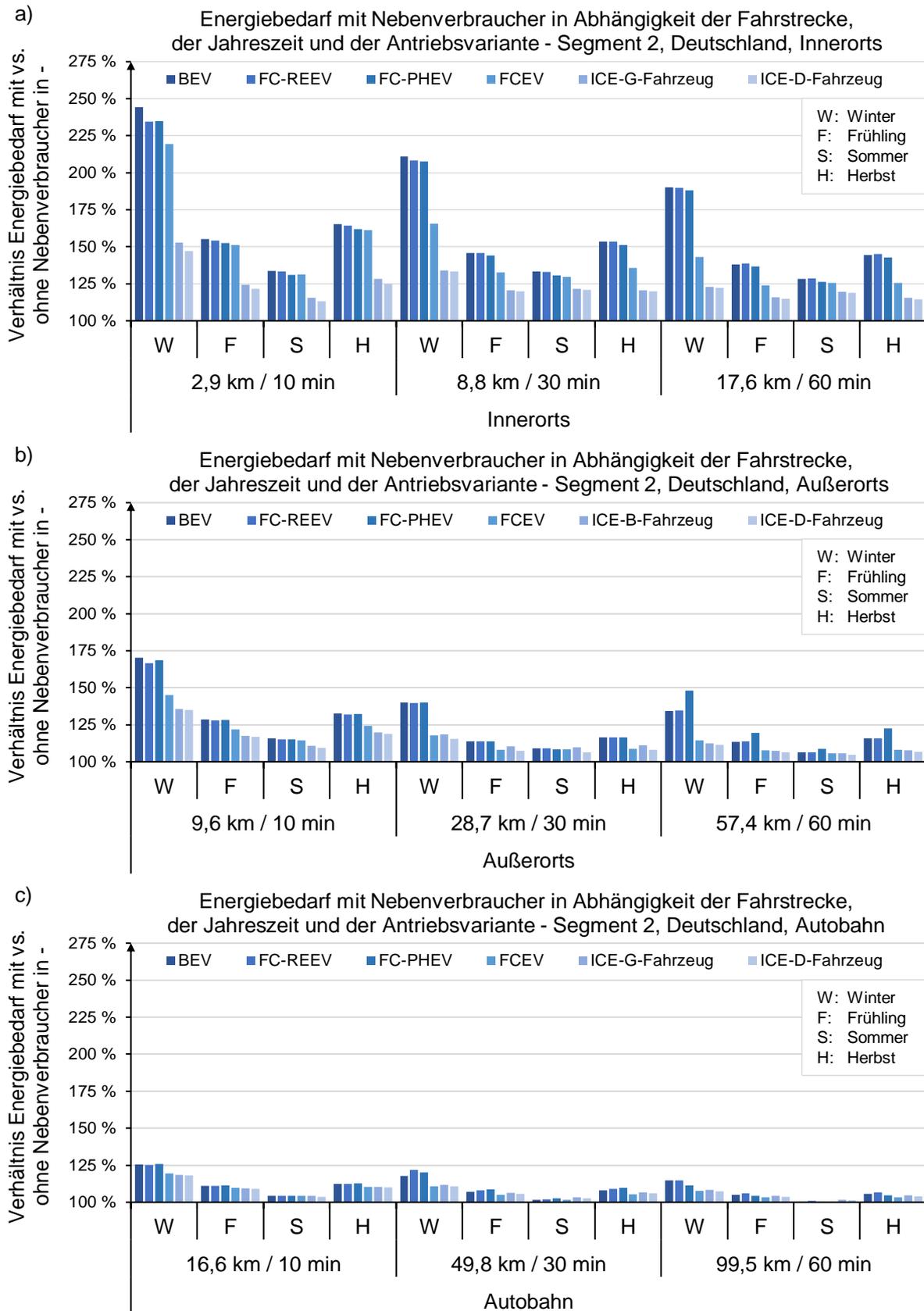


Abbildung 6-5 Verhältnis des Energiebedarfs mit vs. ohne Nebenverbraucher in Abhängigkeit der Fahrstrecke, der Jahreszeit und der Antriebsvariante a) Innerorts, b) Außerorts und c) Autobahn

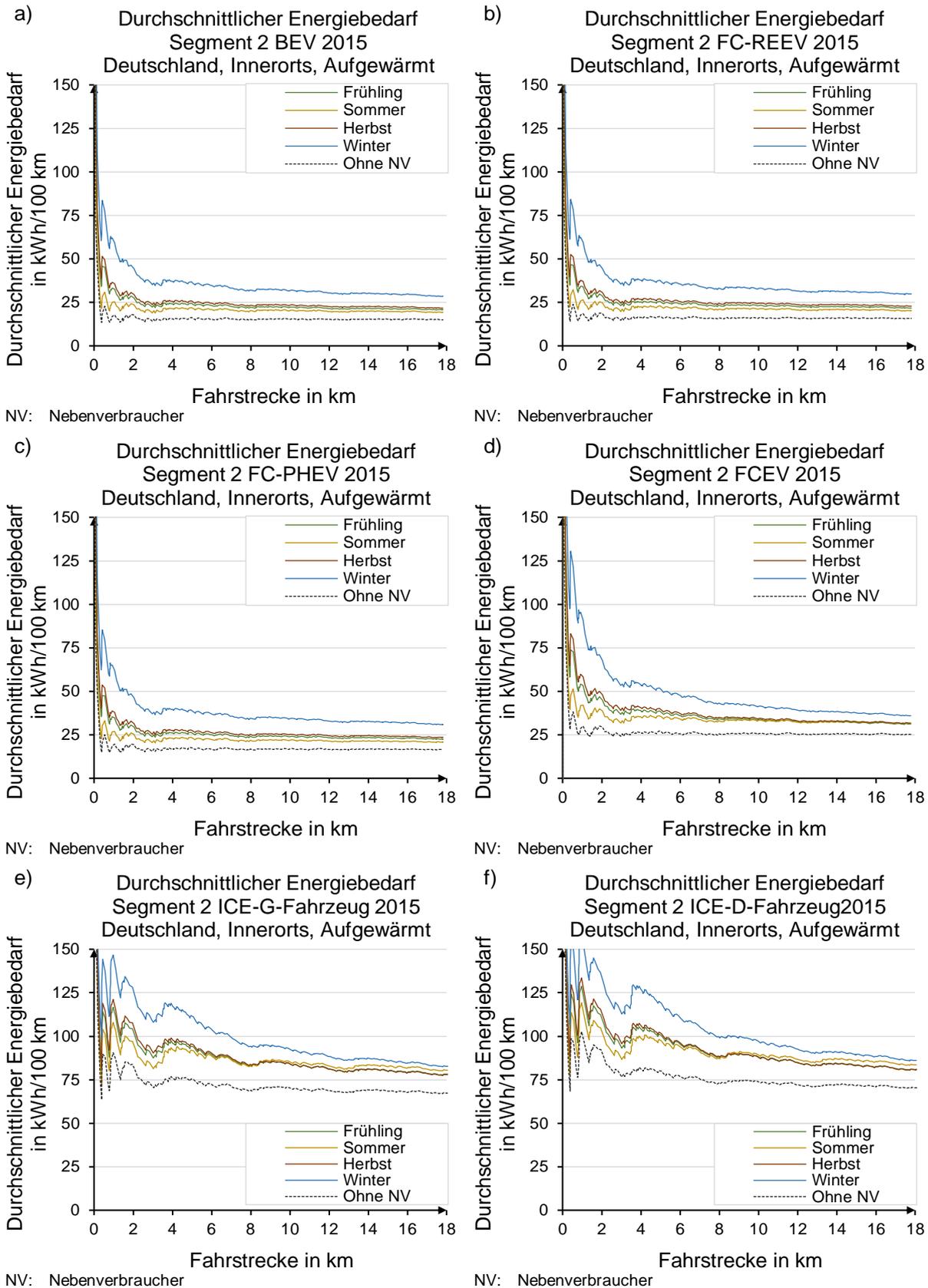


Abbildung 6-6 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassesegments in dem Innerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug

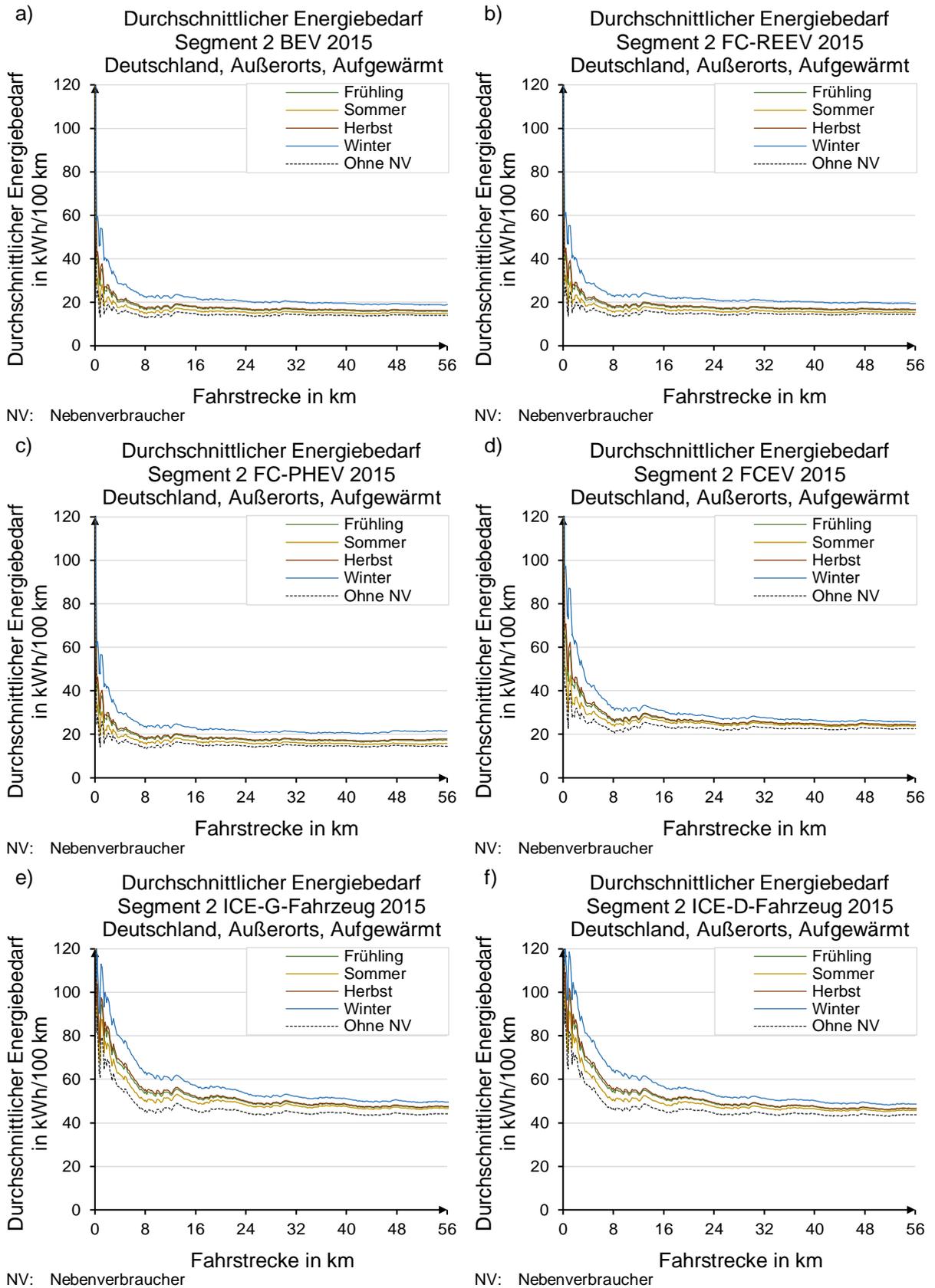


Abbildung 6-7 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Außerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug

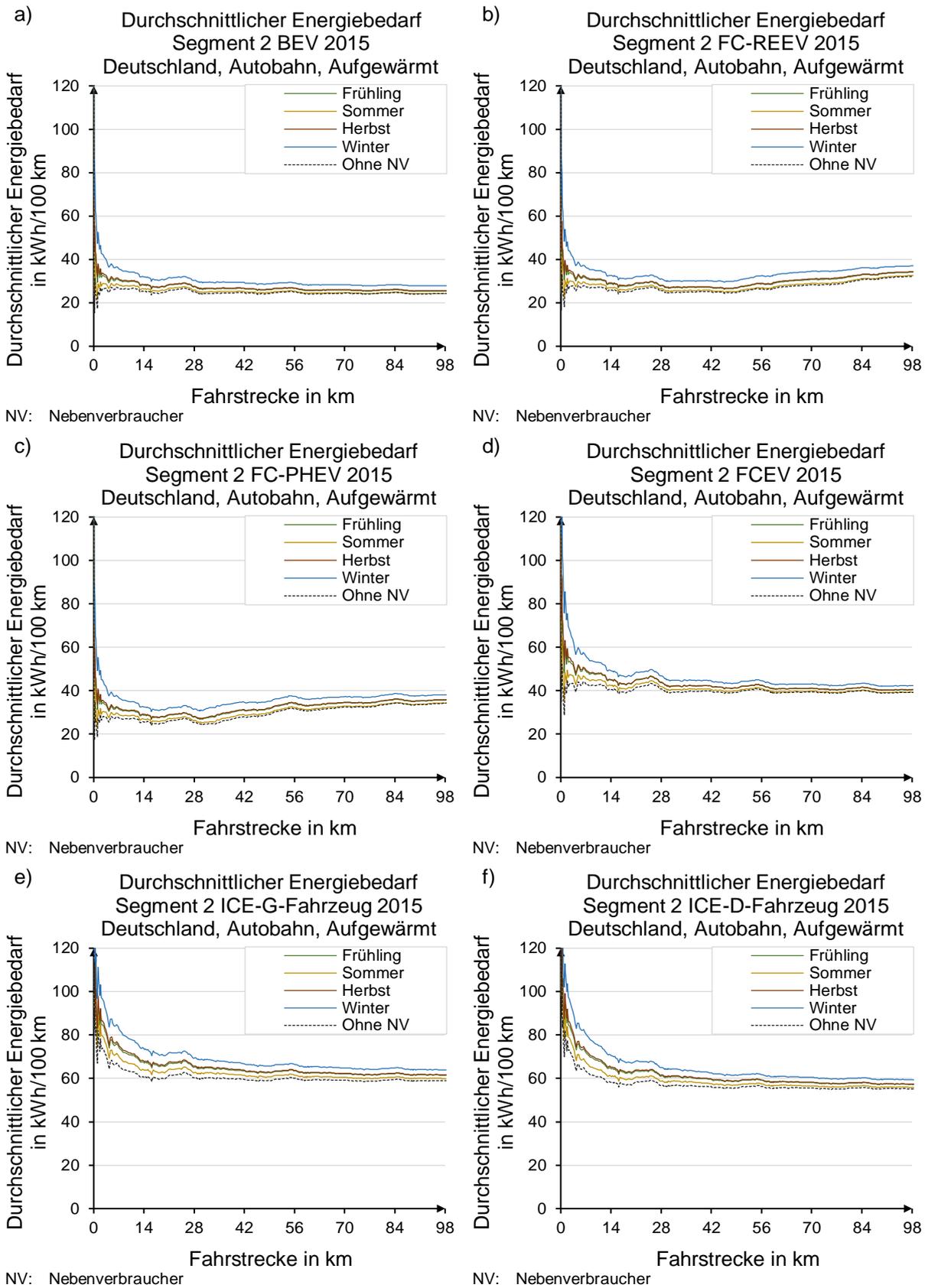


Abbildung 6-8 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Autobahnzyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug

6.1.2.2 Saisonaler Energiebedarf in Spanien und in Norwegen

Die Antriebsstrangvarianten BEV, FCEV und ICE-G-Fahrzeug werden zusätzlich zu deutschen auch unter spanischen und unter norwegischen Wetterprofilen analysiert, um den Einfluss des gesamtheitlichen Energiebedarfs für unterschiedliche europäische Klimarandbedingungen zu bewerten. Die Abbildung 6-10 auf der Seite 177, die Abbildung 6-11 auf der Seite 178 und die Abbildung 6-12 auf der Seite 179 stellen diese für den Innerorts-, für den Außerorts- und für den Autobahnzyklus gegenüber. Dabei entsprechen in jeder Abbildung die Diagramme a) dem BEV, c) dem FCEV und e) dem ICE-G-Fahrzeug unter spanischen und die Diagramme b) dem BEV, d) dem FCEV und f) dem ICE-G-Fahrzeug unter norwegischen Klimarandbedingungen. Die Abbildung 6-9 vergleicht den jährlichen Energiebedarf der drei Klimaregionen in dem Innerortszyklus, für eine leichtere Bewertung des Einflusses der Klimaregion.

Bei einer Betrachtung des **Innerortsprofils** zeigt sich deutlich, dass in dem Vergleich zu norwegischen in spanischen Wetterbedingungen in den meisten Jahreszeiten ein geringerer Energiebedarf benötigt wird. In dem Winter, in dem Frühling und in dem Herbst liegt der durchschnittliche Verbrauchswert unterhalb des norwegischen Pendant. Der reduzierte Energiebedarf liegt an wärmeren Klimarandbedingungen, einer somit meist geringeren Temperaturdifferenz der Starttemperaturen der Fahrgastzelle zu dessen Komforttemperatur und einer daraus resultierenden, niedrigeren Heizleistung, an besseren anfänglichen Komponenteneigenschaften und an niedrigeren Fahrwiderständen. In dem Sommer nehmen die Verbrauchswerte in Spanien aufgrund erhöhter Temperaturen und des folglich gesteigerten Kühlbedarfs größere Werte an. Speziell in dem Innerortszyklus ist ein hoher Energiebedarf durch eine starke Kühlleistung in den Durchschnittswerten sichtbar. Eine permanent hohe, thermische Belastung führt bei den beiden Varianten mit der Möglichkeit der Nutzung der Abwärme bei kalten Bedingungen dazu, dass der Sommerverbrauch nach ca. vier Kilometern in dem Vergleich mit den anderen Jahreszeiten stetig höher liegt. Dass sowohl bei dem FCEV als auch bei dem ICE-G-Fahrzeug zu einem gleichen Zeitpunkt der Wechsel des höchsten Verbrauchs von der Jahreszeit Winter zu der Jahreszeit Sommer erfolgt, ist ein Sonderfall, da sowohl die thermischen Massen der Energiewandler und deren Effizienz als auch der anteilige Abtransport der Abwärme unterschiedlich sind. In dem **Außerortsprofil** sind die Endwerte der durchschnittlichen, spanischen Winter- und Sommerverbräuche des FCEVs und des ICE-G-Fahrzeugs auf einem identischen Niveau. Auf der **Autobahn** liegen die Werte des Sommers unter den Ergebnissen des Winters. Der Wechsel der jeweiligen Jahreszeit mit dem höchsten Energiebedarf unterhalb der Fahrprofile beruht auf einem abfallenden Anteil der Nebenverbraucher bei steigenden Fahrwiderständen mit einem erhöhten Einfluss des Luftwiderstands. Bei einer Betrachtung des durchschnittlichen Verbrauchs der Jahreszeiten unter norwegischen Klimateigenschaften fällt der Energiebedarf in absteigender Reihenfolge wie folgt aus: Winter, Herbst, Frühling und Sommer. Diese Anordnung resultiert aus den kalten Temperaturen in dem Winter, in dem Frühling und in dem Herbst und einer folglich hohen Heizleistung in diesen Jahreszeiten. Lediglich in der Jahreszeit Sommer werden wärmere Temperaturen erreicht. Beispielsweise werden in Oslo nur in den Sommermonaten als mittleres, tägliches Maximum Umgebungstemperaturen höher als 20 °C aufgezeichnet [220]. Durch die moderaten Umgebungstemperaturen in der Jahreszeit Sommer fällt die Temperaturdifferenz zu der Solltemperatur der Kabine und somit der Heiz- bzw. der Kühlbedarf in dem Sommer am geringsten aus. Der Energiebedarf der Jahreszeit Sommer ist in dem Vergleich der Länder Norwegen und Spanien in Norwegen deshalb deutlich niedriger als jener in Spanien.

In der Abbildung 6-9 wird der jährliche Durchschnittsverbrauch für die drei Länder für ein Innerortsfahrprofil verglichen. In dem Diagramm a) ist der Energiebedarf für ein BEV, in dem Diagramm b) ist dieser für ein FCEV und in dem Diagramm c) ist dieser für ein ICE-G-Fahrzeug gegenübergestellt. Die darin verwendeten, saisonalen Energiebedarfe sind anhand des Anteils an Tagen pro Jahr der jeweiligen Jahreszeit gewichtet, um den gemittelten Jahresverbrauch pro 100 km zu erhalten. Aus der Abbildung 6-9 ist zu entnehmen, dass der jährliche Energiebedarf für die wärmste Region, Spanien, für ein BEV und ein FCEV permanent und für ein ICE-G-Fahrzeug bis ca. sechs Kilometer am niedrigsten ausfällt. Diese Feststellung beruht auf einer geringen Abweichung der Starttemperaturen der Kabine zu

deren Solltemperatur bei dem Start der Fahrten, den geringeren Fahrwiderständen bei warmen Temperaturen und einer in dem Vergleich zu der elektrischen Heizung effizienteren (und thermisch limitierten) Kühlleistung. Bei dem Antrieb mit einem Verbrennungsmotor ist die Heizleistung aufgrund des Luftheizers begrenzt. Darauf basierend fällt die zu dem Aufwärmen der Fahrgastzelle bereitgestellte Heizleistung in der Klimaregion Norwegen anfänglich geringer als jener der beiden alternativen Antriebe aus. Über die Fahrzeit erwärmt sich der Verbrennungsmotor und die benötigte Heizleistung wird über die Abwärme des Verbrennungsmotors zu der Verfügung gestellt. Der Einfluss des deutschen Klimas liegt aufgrund niedrigerer Temperaturen und darauf basierend höheren Heizleistungen zwischen dem Einfluss des Klimas in Spanien und jenem in Norwegen. In der kältesten Region, Norwegen, ist der Einfluss der Nebenverbraucher aufgrund der vorherrschenden kalten Bedingungen und der angenommenen Parksituation „Aufgewärmt“ mit einer resultierenden, ausgeprägten Heizleistung für die Antriebsvarianten BEV und FCEV permanent und für das ICE-G-Fahrzeug bis ca. sechs Kilometer am signifikantesten.

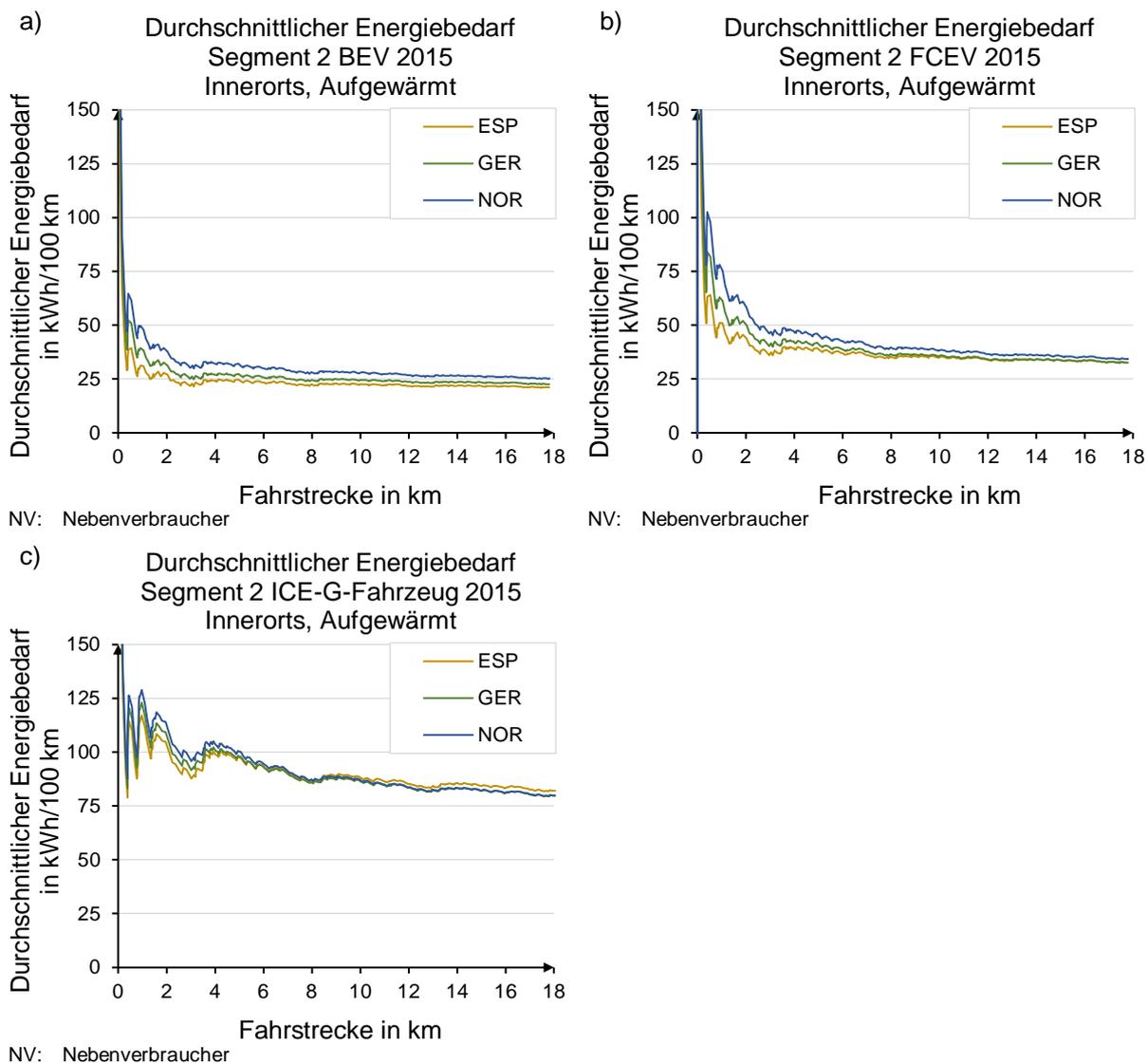


Abbildung 6-9 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassesegments in dem Innerortszyklus unter spanischen, unter deutschen und unter norwegischen Klimabedingungen a) BEV, b) FCEV und c) ICE-G-Fahrzeug

Da die jeweilige Parksituation, „Aufgewärmt“, „Schatten“ oder „Vorkonditioniert“ die Startbedingungen und somit den Energiebedarf beeinflusst, werden die verschiedenen Ausgangssituationen in dem nächsten Unterpunkt untersucht und der Einfluss dieser länderspezifisch verglichen und bewertet.

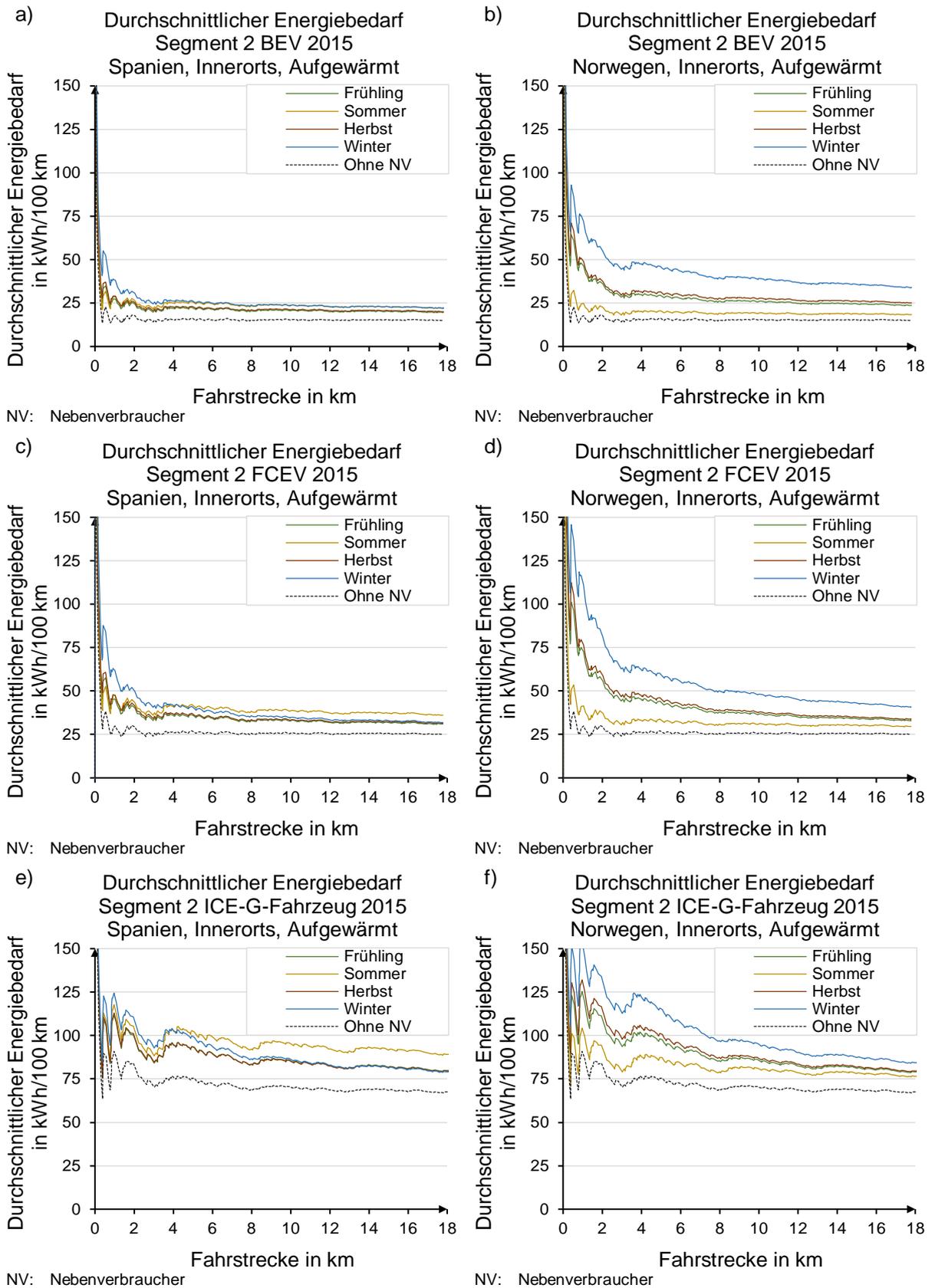


Abbildung 6-10 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Innerortszyklus unter spanischen und unter norwegischen Klimabedingungen a) und b) BEV, c) und d) FCEV und e) und f) ICE-G-Fahrzeug

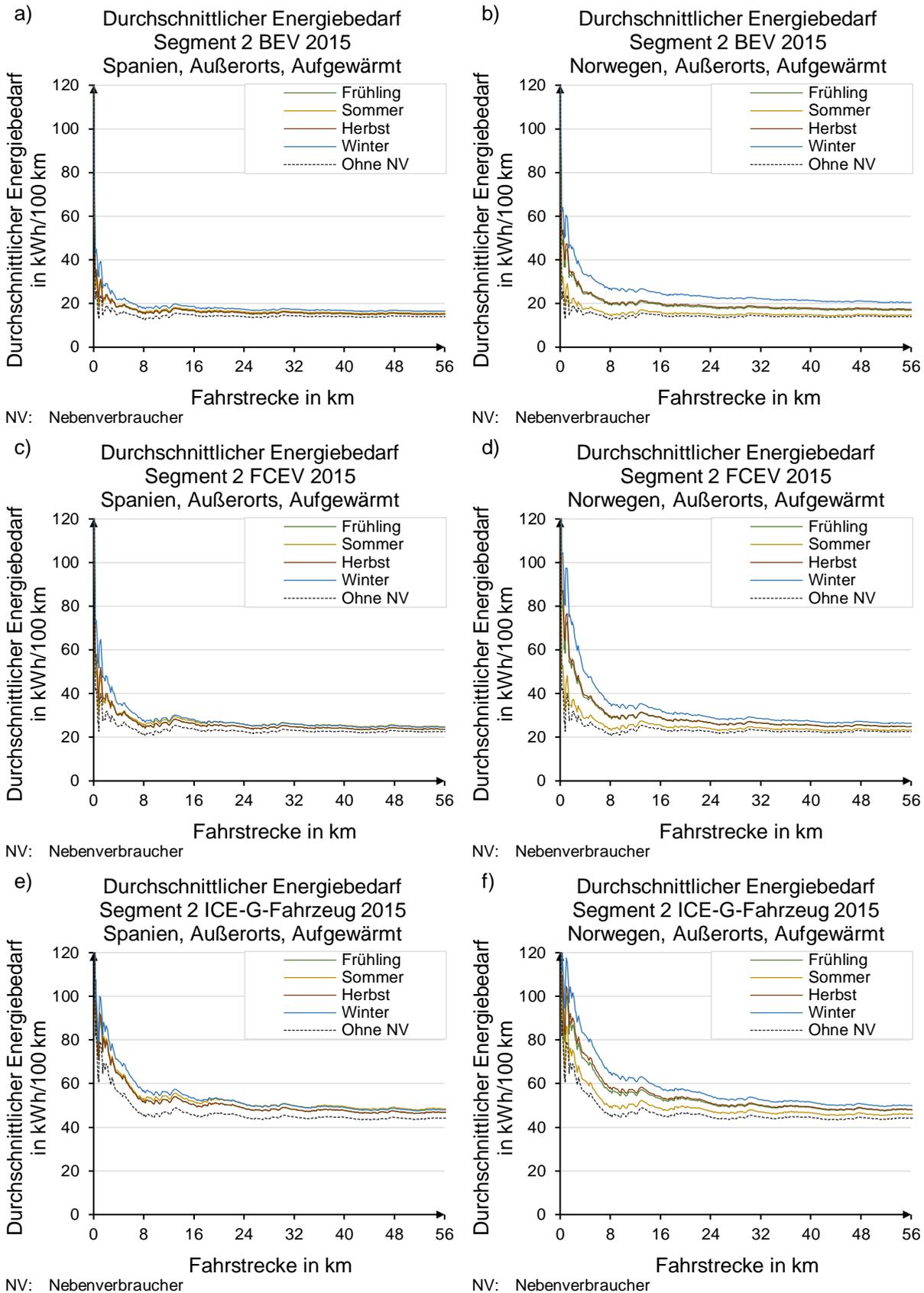


Abbildung 6-11 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassesegments in dem Außerortszyklus unter spanischen und unter norwegischen Klimabedingungen a) und b) BEV, c) und d) FCEV und e) und f) ICE-G-Fahrzeug

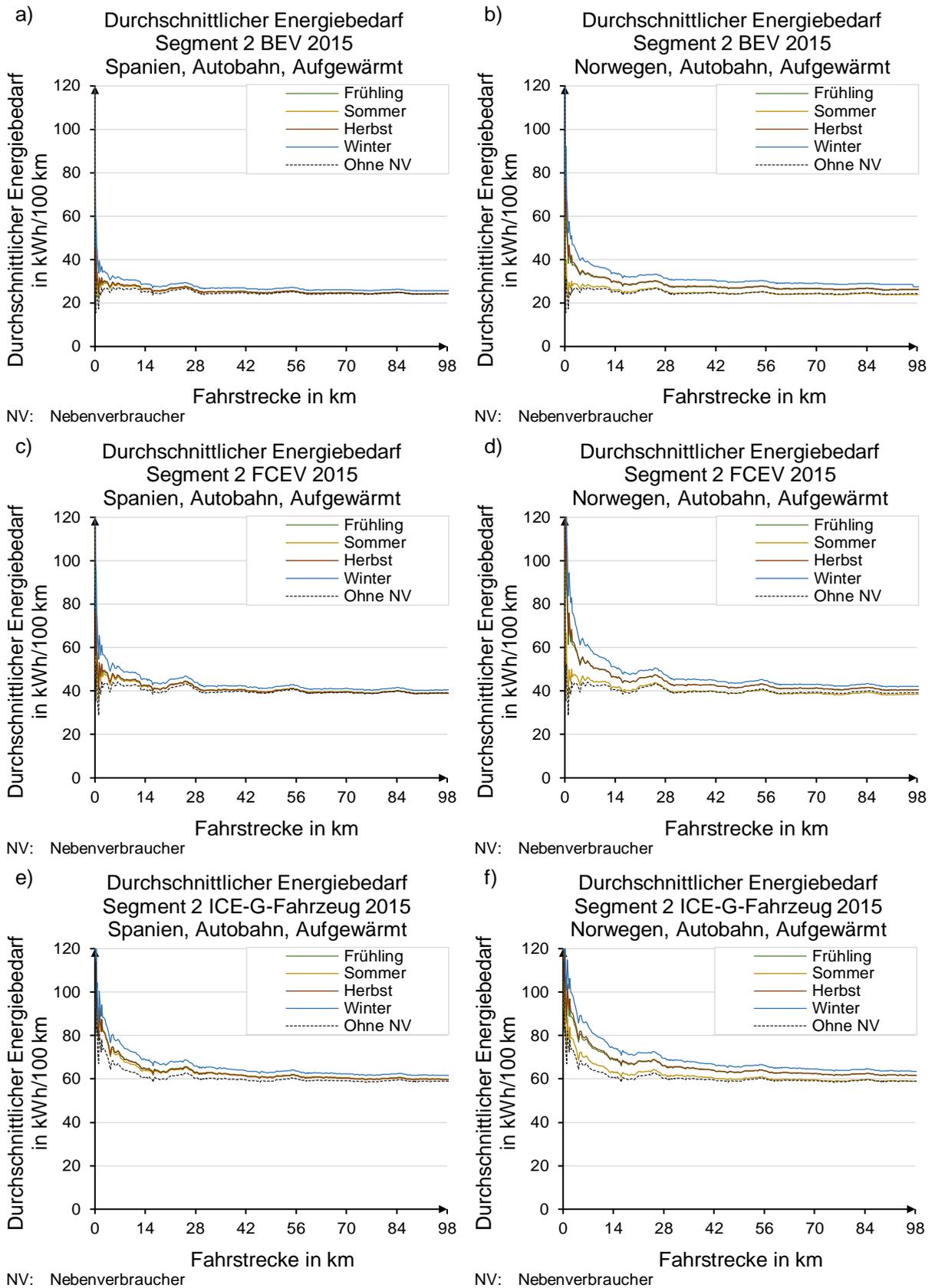


Abbildung 6-12 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments in dem Autobahnzyklus unter spanischen und unter norwegischen Klimabedingungen a) und b) BEV, c) und d) FCEV und e) und f) ICE-G-Fahrzeug

6.1.2.3 Variable Startbedingungen in Deutschland, in Spanien und in Norwegen

Die Analyse der verschiedenen Startbedingungen, „Aufgewärmt“, „Schatten“ und „Vorkonditioniert“, wird anhand der Abbildung 6-13 auf der Seite 181 diskutiert. In dieser sind die drei initialen Bedingungen für den in dem Betrachtungsjahr 2015 von dem Nebenverbrauch am höchsten beeinflussten Antrieb, das batterieelektrische Fahrzeug, und Fahrzyklus, der Innerortszyklus, in verschiedenen Kombinationen gegenübergestellt.

Unter den **in Deutschland vorherrschenden Klimarandbedingungen** wird zunächst die Parksituation „Schatten“ mit der Ausgangssituation „Vorkonditioniert“ verglichen. Die Abbildung 6-13 stellt diese in den Diagrammen a) und b) gegenüber. Aus den beiden Darstellungen geht hervor, dass der Energiebedarf in dem Zustand „Vorkonditioniert“ aufgrund einer niedrigeren Leistung der Nebenverbraucher geringer ausfällt. In dem Gegensatz zu dem Schattenfall sind die Komforttemperaturen bei einem Fahrtantritt bereits erreicht. Daraus resultierend wird lediglich eine thermische Leistung für das Halten dieser aufgebracht. Niedrigere, initiale Verbrauchswerte sind die Folge. Ein benötigter Energiebedarf für das Erreichen des vorkonditionierten Zustands vor dem Start einer Fahrt ist hierbei nicht bilanziert. Für eine faire Betrachtung müsste dieser berücksichtigt werden. Wird die Ausgangssituation „Schatten“ mit der Ausgangssituation „Aufgewärmt“, Abbildung 6-6 a) auf der Seite 172, verglichen, wird festgestellt, dass der Energiebedarf der Jahreszeiten Frühling, Winter und Herbst leicht erhöht ist. In der Jahreszeit Sommers ist dies, aufgrund des eingesetzten HV-PTCs mit einer Leistung von 6 kW, anfänglich ebenfalls zutreffend. Ab ca. drei Kilometern wird der Energiebedarf der Ausgangssituation „Aufgewärmt“ erreicht. Darauf folgend ist der durchschnittliche Verbrauchswert in dem Sommer etwas niedriger. Durch die Ausgangssituation „Schatten“ wird der Heizbedarf bei kalten Startbedingungen erhöht, während der Kühlbedarf bei warmen Startbedingungen verringert wird. Durch die hohe Heizleistung und das Ausnutzen des Kältemittelkreisprozesses ergeben sich die beschriebenen Unterschiede der Ausgangssituationen.

Für eine Untersuchung der Startbedingungen anhand **spanischer Klimaeinflüsse**, vgl. dazu Diagramm c) und d) der Abbildung 6-13, wird der Energiebedarf für ein Fahrzeug, welches bei Fahrtantritt unter Sonneneinfluss geparkt und dadurch aufgewärmt wird mit einem in dem Schatten stehenden Fahrzeug verglichen. Bei der Gegenüberstellung der Szenarien zeigt sich, dass der Energiebedarf in dem Sommer in dem Schattenfall aufgrund eines weniger aufgeheizten Fahrzeugs niedriger ausfällt. In den Jahreszeiten Frühling und Herbst sind die durchschnittlichen Verbrauchswerte der beiden Startbedingungen etwa identisch. Ein geringerer Heizbedarf in der Früh in dem aufgeheizten Zustand hebt sich mit einer niedrigeren Kühlleistung an dem Nachmittag in dem Schattenfall annähernd auf. In dem Winter wird ein erhöhter Energiebedarf in dem Schattenfall festgestellt. Basierend auf einer, durch fehlende Sonneneinstrahlung, kälter angenommene Fahrgastzelle und einer somit größeren Abweichung zu der Solltemperatur muss eine höhere Heizleistung zu der Verfügung gestellt werden. Der Energiebedarf steigt folglich an und ein erhöhter Mehrbedarf in der Jahreszeit Winter ist damit erklärbar.

Bei einer Betrachtung der Startbedingungen unter **norwegischen Klimaeinflüssen** werden die Szenarien „Aufgewärmt“ und „Vorkonditioniert“ beleuchtet. In den Diagrammen e) und f) der Abbildung 6-13 ist, aufgrund der sehr kalten Umgebungstemperaturen, ein signifikanter Unterschied der beiden Ausgangsbedingungen in dem benötigten Energiebedarf feststellbar. Während die Verbrauchsdifferenz der beiden Szenarien für die Jahreszeit Sommer noch moderat ausfällt, wächst diese für die Jahreszeiten Frühling und Herbst an und ist in dem Winter am stärksten ausgeprägt. Der Anstieg des Verbrauchunterschieds zwischen den Parksituationen lässt sich mit einer immer größer werdenden Temperaturdifferenz zu der Solltemperatur und einer resultierenden, höheren Heizleistung erklären. Durch eine Vorkonditionierung muss die Betriebstemperatur anfänglich nicht mehr durch einen hohen Energiebedarf erreicht, sondern lediglich während der Fahrt gehalten werden. Dieser Umstand führt dazu, dass der initiale Verbrauch sinkt und die realisierbare Reichweite steigt. Der durch eine Vorkonditionierung gewonnene Vorteil während einer Fahrt wird durch eine Verschiebung des Zeitpunkts des Energiebedarfs des Aufwärmens in einen stationären, an einem Ladegerät angeschlossenen, Zustand erreicht. Dieser ist in dem Diagramm nicht berücksichtigt und muss für einen fairen Vergleich miteinbezogen werden.

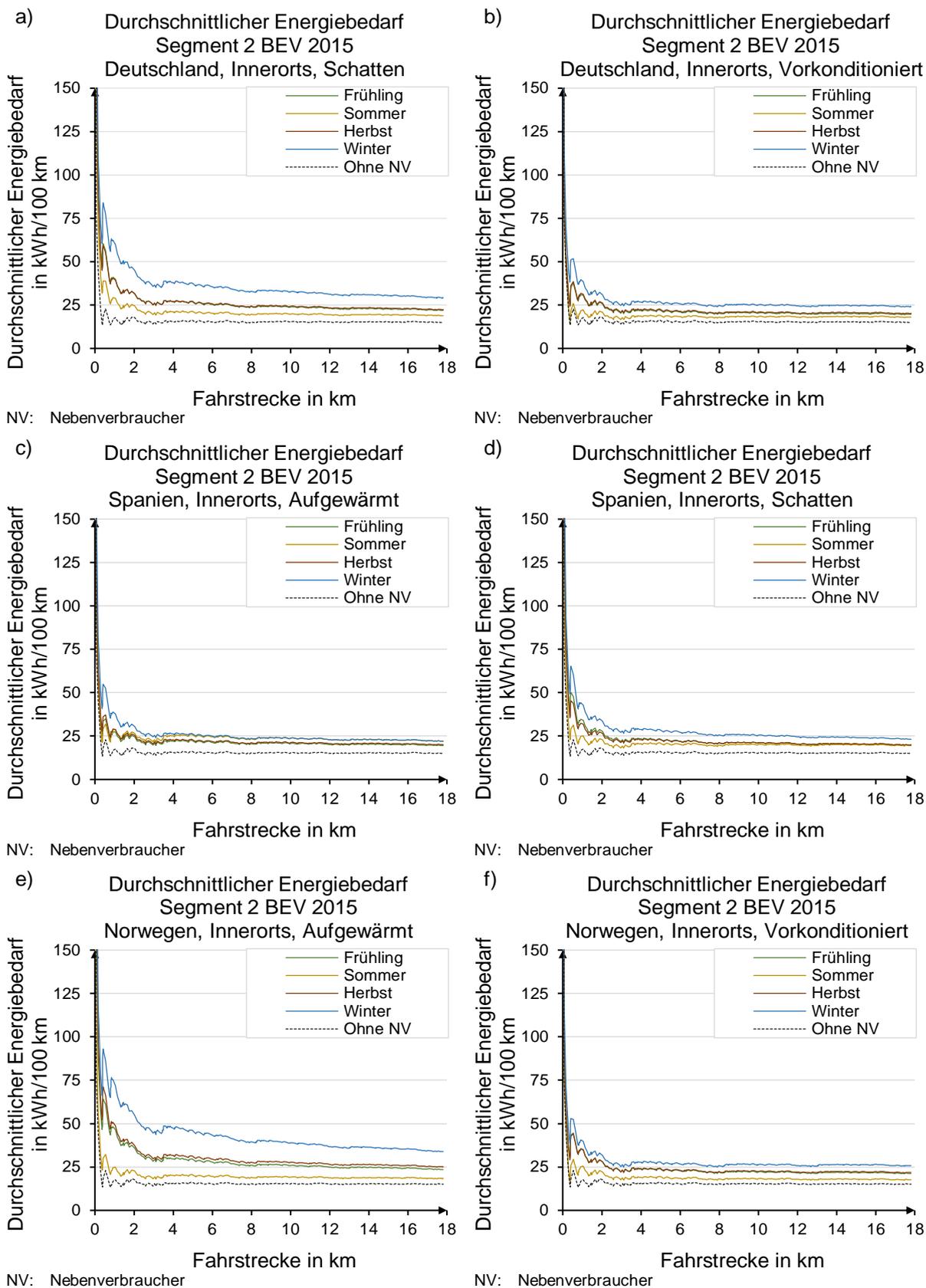


Abbildung 6-13 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke des BEVs des Mittelklassensegments in dem Innerortszyklus für unterschiedliche Startbedingungen unter a) und b) deutschen, c) und d) unter spanischen und e) und f) unter norwegischen Klimabedingungen

6.1.2.4 Variable Wetterbedingungen in Deutschland

In dem Rahmen der Analyse des länderspezifischen, saisonalen Verbrauchs und bei den verschiedenen Parksituationen werden saisonale Effekte betrachtet. Dabei werden die Klimarandbedingungen und Startzeiten nach deren Auftretswahrscheinlichkeit gewichtet untersucht. Für eine zusätzliche Bewertung der Auswirkungen sehr kalter und sehr warmer Ausgangsbedingungen wird folgend der Einfluss extremer Wetterbedingungen auf den Energiebedarf analysiert. Hierbei werden die kältesten bzw. die wärmsten 20%- und 1%-Wetterprofile der Jahreszeit Winter bzw. Sommer in Relation zu dem durchschnittlichen Winter-, dem durchschnittlichen Sommer- und dem durchschnittlichen Jahresbedarf gesetzt.

Die Analyse des Einflusses variabler Wetterbedingungen auf den Energiebedarf in dem Betrachtungsjahr 2015 erfolgt anhand definierter Momentaufnahmen und unterschiedlichen Klimarandbedingungen. Die dabei gewählten Betrachtungspunkte repräsentieren je ein Kurzstrecken-, ein Mittelstrecken- und ein Langstreckenprofil. In dem Innerortszyklus wird bei acht Kilometern, in dem Außerortsfahrprofil bei 25 Kilometern und während einer Autobahnfahrt bei 50 Kilometern der bis dahin erreichte, durchschnittliche Energiebedarf verglichen. Bei der durchgeführten Analyse werden die unterschiedlichen Wetterbedingungen jährlich, durchschnittlicher Winter und durchschnittlicher Sommer, die kältesten bzw. die wärmsten 20 % der jeweiligen Jahreszeit und der als Extremfall definierte 1%-Fall der kältesten bzw. der wärmsten Umgebungseigenschaften untersucht. Dabei werden alle Startzeiten nach deren Anteil an der Tagesfahrleistung gewichtet. Die Abbildung 6-14 visualisiert die daraus resultierenden Ergebnisse für a) das Kurzstreckenprofil, b) das Mittelstreckenprofil und c) das Langstreckenprofil. An der Ordinate der Balkendiagramme ist der durchschnittliche Verbrauchswert auf einhundert Kilometern in der Einheit kWh/100 km angegeben. Zusätzlich ist das relative Verhältnis zu dem Energiebedarf ohne Nebenverbraucher in den Balken dargestellt. An der Abszisse sind die verschiedenen Klimarandbedingungen aufgetragen. Die witterungsbedingten Resultate sind jeweils für die Fahrzeugvarianten BEV, FCEV und ICE-G-Fahrzeug der Mittelklasse unter dem Einfluss der Ausgangssituation „Aufgewärmt“ gezeigt und werden folgend diskutiert.

Wird der Einfluss der verschiedenen Szenarien des **Kurzstreckenfahrers** betrachtet, wird nach acht Kilometern Innerorts festgestellt, dass der Sommerverbrauch in dem Vergleich zu dem jährlichen Bedarf für die Batterievariante deutlich geringer, für das FCEV moderat niedriger und für das Fahrzeug mit einem Ottomotor nahezu identisch ist. Der deutliche Unterschied zwischen den Varianten resultiert zu dem einen aus den unterschiedlichen Möglichkeiten und Ausnutzungsgraden der Abwärmenutzung. Während bei dem Szenario BEV für das Betrachtungsjahr 2015 angenommen wird, dass keine Abwärme genutzt werden kann, können die beiden anderen Varianten diese effizient für die Heizung einsetzen. Zu dem anderen fallen die Basiswerte der Verbrauchswerte ohne Nebenverbraucher unterschiedlich aus. Daraus resultierend ist der relative Einfluss der Nebenverbraucherleistung beispielsweise für das Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor in dem Vergleich zu einem batteriebetriebenen Derivat prinzipiell niedriger. Wird allgemein der Einfluss des Winters und jener des Sommers analysiert, können generell höhere Energiebedarfe in der kälteren Jahreszeit festgestellt werden. Dies liegt, wie bereits in dem Kapitel 6.1.2.1 beschrieben, an den erhöhten Fahrwiderständen, den niedrigeren Antriebsstrangwirkungsgraden und dem erhöhten Nettoenergiebedarf bei einem Aufwärmen in dem Vergleich zu einer identischen Bruttoleistung des Abkühlens. Werden die verschiedenen Wetterbedingungen der 20 % bzw. der 1 % kältesten bzw. wärmsten Wettereigenschaften des Kurzstreckenfahrers hinsichtlich des Einflusses auf den Energiebedarf verglichen, ist feststellbar, dass die Winter-Szenarien eine erhöhte Auswirkung besitzen. Während der durchschnittliche Sommerverbrauch relative Energiebedarfswerte in dem Vergleich zu dem NEFZ-Verbrauch von 120 % bis 130 % aufweist, liegen die Extremwerte des Sommers noch zwischen 136 % und 164 %. In den Winter-Szenarien erreichen bereits die relativen Angaben des durchschnittlichen Winters ein ähnliches bis ein höheres Niveau, 135 % bis 207 %. Bei der Betrachtung der 1 % kälteste Winterprofile steigen diese auf 150 % bis 371 % weiter an. Der hohe Einfluss in den extremen Winter-Szenarien basiert auf einer hohen Heizlast für das Erreichen und für das Halten der Komforttemperaturen. Anfänglich steht bei keiner Antriebsvariante eine Abwärme zu der Verfügung und die Heizleistung muss über ein elektrisches Heizelement bereitgestellt werden.

Bei den beiden alternativen Derivaten, dem BEV und dem FCEV, der Mittelklasse steht dazu ein 6-kW- und bei der konventionellen Variante, dem ICE-G-Fahrzeug, ein 2-kW-Heizer für das Aufwärmen der Fahrgastzelle zu der Verfügung. Zudem wird, wie in dem Kapitel 5.1.1 beschrieben, das Batteriesystem bei Temperaturen kleiner als 0 °C und das Brennstoffzellensystem bei Temperaturen kleiner als 5 °C anfänglich mit aufgeheizt. Bei den beiden alternativen Antriebsstrangkonfigurationen fällt der damit verbundene, zusätzliche Energiebedarf verstärkt in das Gewicht, da in dem Vergleich zu der konventionellen Variante ein geringerer Basisverbrauch und eine erhöhte Leistungsfähigkeit der elektrischen Zuheizung vorhanden sind. Für das BEV bzw. für das FCEV liegt der Energiebedarf in dem Szenario der kältesten 20%-Winterbedingungen bei 278 % bzw. bei 203 %, während die ICE-G-Fahrzeug-Variante aufgrund einer niedrigeren elektrischen Heizleistung und einem höheren Basisverbrauch nur 145 % aufweist. Bei der Betrachtung der kältesten 1 % der Wetterprofile des Winters steigt der relative Anteil für das BEV auf 371 %, für das FCEV auf 257 % und für das ICE-G-Fahrzeug auf 150 % weiter an. Die Erhöhung des Energiebedarfs basiert auf einer höheren thermischen Last, auf ineffizienten Komponenteneigenschaften, beispielsweise basierend auf erhöhten Reibverlusten, und auf erhöhten Fahrwiderständen. Die deutlich stärkere Änderung des Einflusses bei den alternativen Antrieben, von 278 % auf 371 % bei dem BEV bzw. von 203 % auf 257 % bei dem FCEV, begründet sich aus einer Möglichkeit einer weiteren Erhöhung der elektrischen Heizleistung. Während bei dem ICE-G-Fahrzeug bereits in dem 20%-Fall das Maximum des Zusatzheizers abgerufen wird, reduziert sich jene für die Heizung der Fahrgastzelle verwendete elektrische Leistung für die BEV- und für die FCEV-Variante in diesem Szenario, da die Komforttemperatur erreicht wird. Bei der 1%-Betrachtung liegt die volle Heizlast länger an. Somit steigert sich die aufgewandte Zusatzleistung für die Klimatisierung der Fahrgastzelle für die alternativen Antriebe, während bei dem ICE-G-Fahrzeug diese nahezu identisch bleibt.

Werden die Auswirkungen der Klimarandbedingungen für die beiden Fahrscenarien, **Mittelstrecken- und Langstreckenfahrer**, analysiert, ist ein identisches Verhalten feststellbar. Der relative Einfluss der Nebenverbraucher ist dabei aufgrund einer längeren Fahrstrecke und erhöhten Fahrwiderständen geringer. Besonders ein niedrigerer Anteil des initialen Energiebedarfs für das Erreichen der Solltemperaturen und das Erreichen der Möglichkeit der Ausnutzung der Abwärme machen sich hier bemerkbar. Wird beispielsweise der Mehrverbrauch in dem Außerortsfahrprofil in den verschiedenen Winterfällen verglichen, sticht ein deutlich niedrigerer Einfluss für das FCEV in dem Vergleich zu einem Kurzstreckenfahrer heraus. Der verringerte Einfluss der zusätzlichen Nebenverbraucherleistung auf den Energiebedarf resultiert in diesem Fall aus einer Steigerung des Gesamtwirkungsgrads durch das Ausnutzen der verfügbaren Abwärme. Durch die unterschiedlichen Auswirkungen der Nebenverbraucher, bedingt durch die Abwärmenutzung, wird festgestellt, dass der absolute Verbrauchsunterschied des BEVs zu den beiden anderen Antriebsstrangvarianten in dem Winter etwas geringer wird. In dem Sommer ist jener, durch die Abwärmenutzung gewonnene, Vorteil obsolet. In dem Sommer steigt der absolute Energiebedarf der verschiedenen Antriebskonfigurationen für das Fahrscenario Langstreckenfahrer nahezu identisch an. In dem Fahrprofil Mittelstreckenfahrer erhöht sich der absolute Energiebedarf des ICE-G-Fahrzeugs etwas mehr als jener des FCEVs, während sich jener des FCEVs etwas mehr als jener des BEVs erhöht.

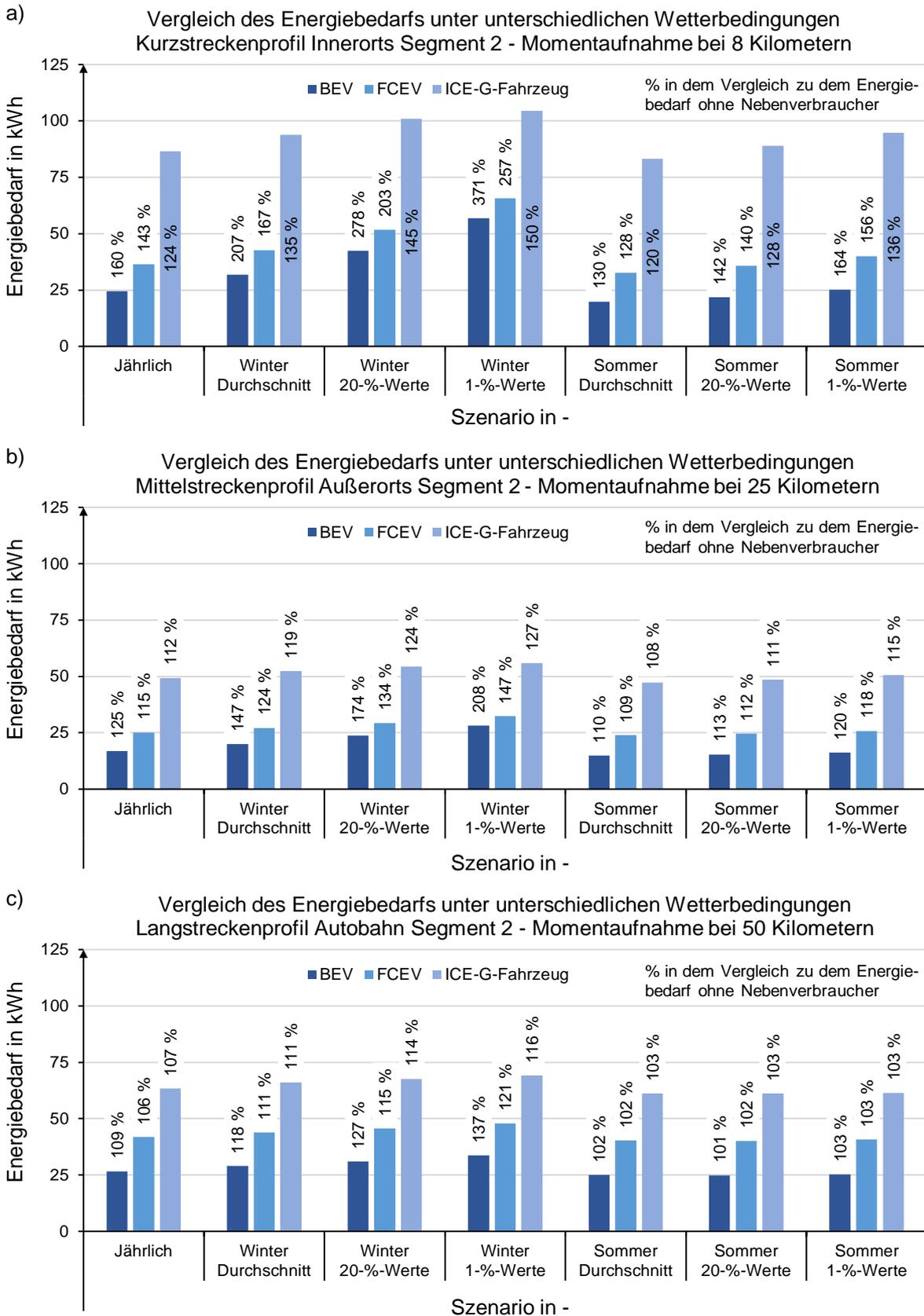


Abbildung 6-14 Vergleich des Energiebedarfs unter unterschiedlichen Wetterbedingungen und unterschiedlichen Fahrprofilen a) Kurzstreckenfahrer Innerorts, b) Mittelstreckenfahrer Außerorts und c) Langstreckenfahrer Autobahn

6.1.3 Fahrzeugflotte

Der Einfluss der Nebenverbraucher hat, wie bereits gezeigt, ein starkes transientes Verhalten, vgl. dazu beispielsweise Abbildung 6-3 b). Folgend wird deshalb die Auswirkung auf eine Fahrzeugflotte mit einem typischen, deutschen Fahrverhalten analysiert, indem die aus der Verteilung der Fahrleistung resultierenden, unterschiedlichen Energiebedarfe adäquat berücksichtigen werden. Dazu werden die in dem Kapitel 3.1.1 ermittelten Verteilungen der Fahrleistungen über der Fahrstrecke der unterschiedlichen Fahrprofile für die drei Fahrzeugsegmente herangezogen und der fahrsituationsbezogene Verbrauchswert mit dem korrespondierenden Anteil gewichtet. Die Abbildung 6-15 visualisiert die ermittelte Verteilung der Fahrleistung. In den vier Säulendiagrammen ist diese für a) das Segment 1, b) das Segment 2, c) das Segment 3 und d) für das Segment 1 bis 3 dargestellt. Bei der Betrachtung der Diagramme ist zu erkennen, dass sich der Anteil längerer und schnellerer Fahrten von kleinen Fahrzeugen hin zu größeren erhöht und sich respektive der Anteil kürzerer und langsamerer Profile verringert. Die Verteilung des ersten Segments beruht auf 16 003 Fahrten, jene des zweiten Segments auf 42 929 Fahrten und jene des dritten Segments auf 4 860 Fahrten. Basierend auf der Anzahl der Fahrten wird das Fahrverhalten des zweiten Segments am exaktesten und jenes des dritten Segments am ungenausten repräsentiert. In dem vierten Diagramm ist die Verteilung der Fahrleistung gewichtet über die Segmente dargestellt. Hieraus zeigt sich, dass die Fahrleistung des Segments 2 dominiert.

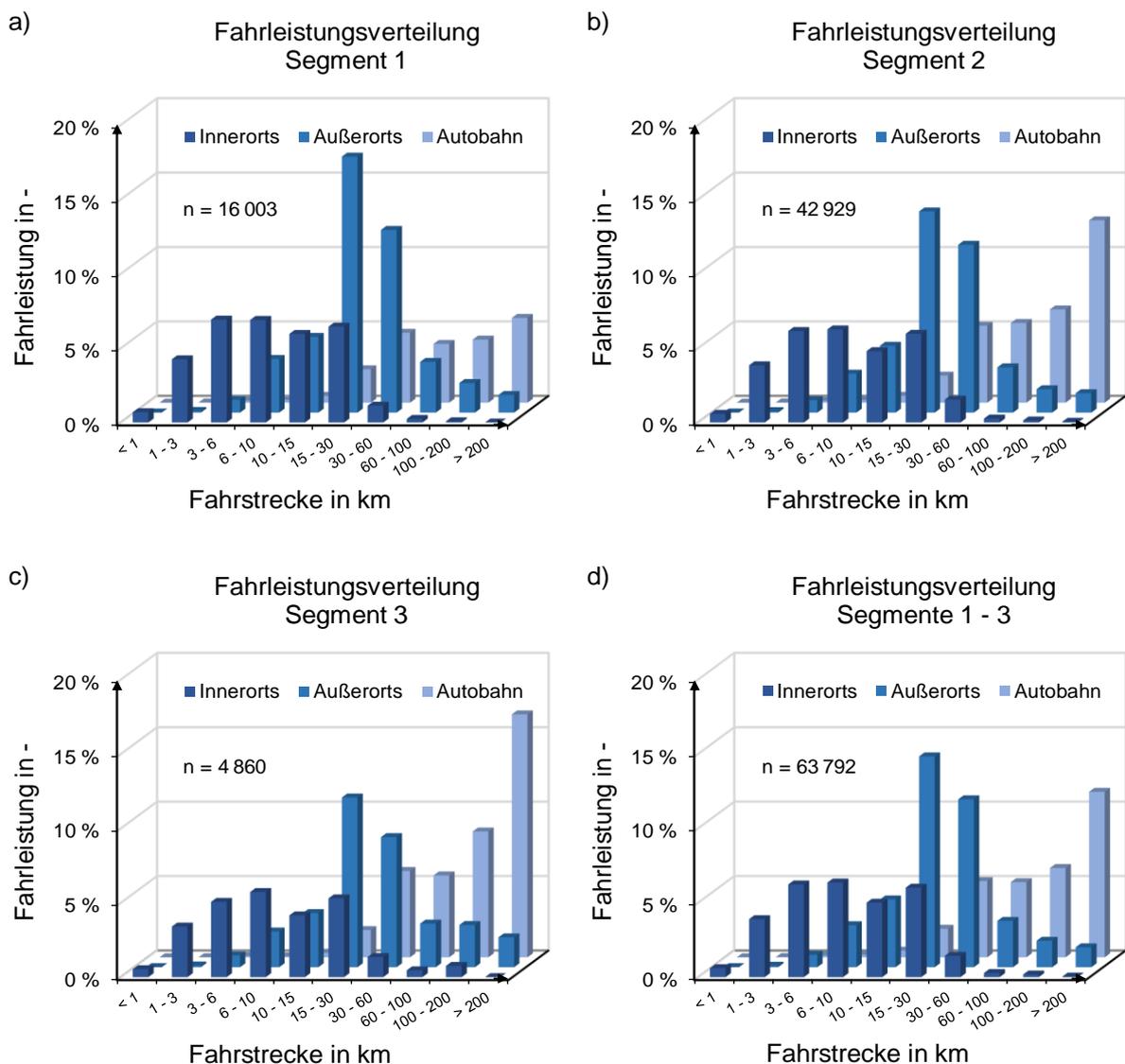


Abbildung 6-15 Fahrleistungsverteilung über der Fahrstrecke für unterschiedliche Fahrprofile für a) das Segment 1, b) das Segment 2), c) das Segment 3 und d) das Segment 1 - 3, Daten gefiltert aus [96]

Mit dem Ziel einen repräsentativen Flottenverbrauch zu ermitteln, werden zunächst die einzelnen von der Jahreszeit, der Startzeit und dem Fahrprofil abhängigen Verbrauchswerte mit der jeweiligen Fahrleistung segmentspezifisch gewichtet und anschließend der Energiebedarf der Flotte über den Anteil der Segmente an der Fahrleistung ermittelt. Die Streckenlängen je Streckentyp werden in zehn länger werdende Bereiche unterteilt, vgl. die Abszissenachse der Abbildung 6-15, und der Energiebedarf wird je Abschnitt verrechnet. Die Unterteilung in länger werdende Streckenabschnitte dient der adäquaten Abbildung des transienten Einschwingvorgangs der Nebenverbraucherleistung. Durch eine initial feinere Rasterung werden anfänglich höhere Änderungsraten des Energiebedarfs berücksichtigt.

Die aus der Gewichtung der Fahrleistung ermittelten Ergebnisse sind in der Abbildung 6-16 einem, über die Fahrleistung der Segmente, gewichteten Zertifizierungsverbrauch und einem, falls vorhandenen, Verbrauchswert aus der Datenbank [219] von www.spritmonitor.de⁵¹ gegenübergestellt. Mittels dieses direkten Vergleichs wird der Mehrbedarf gegenüber der Zertifizierung aufgezeigt und die simulierten Flottenverbräuche anhand realer Verbrauchsangaben plausibilisiert. Auf der Ordinate des Balkendiagramms der Abbildung 6-16 ist der Energiebedarf in der Einheit kWh/100 km und auf der Abszissenachse sind die Antriebsvarianten aufgetragen. In den Balken der gesamtheitlichen Verbrauchswerte ist der relative Mehrbedarf gegenüber dem gewichteten Zertifizierungsverbrauch und in jenem der Datenbank ist das Verhältnis zu dem simulierten Flottenbedarf gegeben.

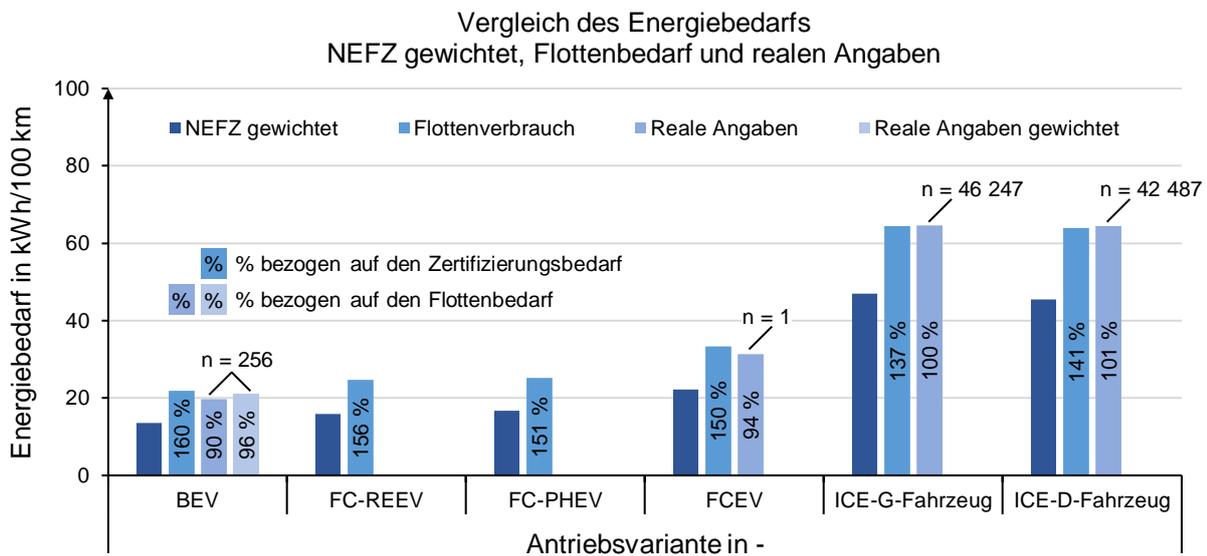


Abbildung 6-16 Vergleich des Energiebedarfs des gewichteten Zertifizierungsverbrauchs mit dem ermittelten Flottenverbrauch und realen Angaben aus [219]

Für eine Ermittlung der Verbrauchswerte aus [219] wird die Fahrzeugvariante auf „Pkw“ gesetzt, die Kraftstoffart des jeweiligen Antriebs, das Baujahr von 2013 bis 2017 und eine Mindestfahrleistung von 1 500 km gefiltert. Die Auswahlkriterien Pkw und Kraftstoffart dienen dazu, der Analyse entsprechende, Antriebe zu betrachten. Mit der Eingrenzung des Jahrs der Fahrzeugherstellung wird sichergestellt, dass eine vergleichbare Technologie verbaut ist. Mit den geforderten Mindestkilometern wird ein initialer Einschwingvorgang der Komponenten ausgeblendet. Für die Ermittlung der Daten für das BEV wird zudem eine Mindestleistung von 30 kW gefiltert. Dies wird angewandt, um eine Vielzahl an Hybrid- und Plug-In-Fahrzeuge auszuschließen. Da trotz der Filterung eine nicht zu vernachlässigende Menge an Plug-In-Varianten in der Datenmenge enthalten sind, werden alle BEV-Angaben zusätzlich manuell geprüft und plausibilisiert. Resultierend werden 256 BEV-Fahrzeuge den drei Segmenten zugeordnet. Die in der Restmenge enthaltenen Verbrauchsangaben werden mit der jeweils gefahrenen Kilometeranzahl

⁵¹ www.spritmonitor.de ist eine Homepage, welche es Fahrzeugnutzern ermöglicht real erfahrene Kraftstoffverbrauchsangaben aufzuzeichnen. Durch die Vielzahl der Angaben ist www.spritmonitor.de eine anwendbare Datenbasis für eine Ermittlung von gesamtheitlichen Energiebedarfen.

gewichtet und, sofern ein Ladewirkungsgrad noch nicht berücksichtigt wurde, durch einen fest angenommenen Wirkungsgrad von 85 % geteilt. Durch das angewandte Vorgehen wird sichergestellt, dass alle Angaben einen Ladewirkungsgrad beinhalten und die Verbrauchsangaben kilometergewichtet eingehen. Final werden die gewichteten Energiebedarfe der BEV-Segmente mit deren prozentualer Fahrleistung multipliziert und der gewichtete Mittelwert der Flotte festgestellt. Für die großen Datenmengen des ICE-G-Fahrzeugs, 46 247 Fahrzeughalter, und des ICE-D-Fahrzeugs, 42 467 Fahrzeughalter, kann eine manuelle Trennung der Segmente nicht ohne einen erhöhten Aufwand durchgeführt werden. Aufgrund der großen Datenbasis wird angenommen, dass das darin enthaltene Mobilitätsverhalten jenes der deutschen Flotte hinreichend genau repräsentiert. Für die Werte des Brennstoffzellenfahrzeugs liegen zu dem Erhebungszeitpunkt ausschließlich Angaben eines Fahrzeughalters vor. Diese sind, aufgrund einer zu geringen Stichprobe, nicht ausreichend repräsentativ und dienen deshalb nur als Anhaltspunkt. Generell wird darauf hingewiesen, dass die Verbrauchsangaben aus [219] lediglich für eine Plausibilisierung genutzt werden.

Bei einer Betrachtung des gesamtheitlichen Energiebedarfs in dem **Vergleich zu den gewichteten NEFZ-Angaben** fällt auf, dass das Verhältnis der konventionellen Antriebe bei etwa 140 % und jenes der alternativen Varianten zwischen 150 % und 160 % liegt. Der größte, relative Unterschied ist, aufgrund der höchsten Antriebsstrangeffizienz und dem Fehlen der Abwärmenutzung, bei dem BEV-Antrieb feststellbar. Bei den FC-PHEV- und bei den FC-REEV-Varianten wird angenommen, dass jede Fahrt mit einem nahezu vollen Batteriespeicher stattfindet. Darauf basierend erfolgt ein hoher Anteil der Fahrleistung rein batterieelektrisch. Aus dem hohen, batteriebetriebenen Fahrleistungsanteil resultiert eine niedrige Abwärmenutzung und somit ein erhöhter relativer Verbrauch. Bei der Betrachtung des FCEVs fällt die relative Steigerung in dem Kontext der alternativen Antriebe am geringsten aus. Dies liegt neben einer Steigerung des Gesamtwirkungsgrads durch die Möglichkeit der Abwärmenutzung auch an einem erhöhten Basisverbrauch. Bei den konventionellen Antrieben fällt die relative Steigerung der Benzinfahrzeug-Flotte etwas geringer als bei jener der Dieselfahrzeuge aus. Dies liegt zu dem einem an einem erhöhten Basisverbrauch und zu dem anderen an einer vermehrten Abwärmenutzung.

Bei einer **Plausibilisierung der gesamtheitlichen Flottenverbrauchsangaben** sticht heraus, dass die konventionellen Energiebedarfswerte nahezu identisch den Durchschnittswerten aus der Datenbank [219] sind. Die Abweichung des Flottenverbrauchs einer typisch deutschen Privat-Pkw-Flotte bestehend aus ICE-G-Fahrzeugen liegt bei 0,4 % und jene bestehend aus ICE-D-Fahrzeugen bei 0,7 %. Durch eine hohe Anzahl an Fahrzeugdaten und einer ausgeprägten Existenz aller Fahrzeugklassen wird angenommen, dass ein typisch deutsches Mobilitätsverhalten durch die Angaben der Datenbank gut abgebildet wird und die Simulationswerte die Realität gut wiedergeben. Bei der Realangabe aus der Datenbank des FCEVs beruht der festgestellte Energiebedarf lediglich auf einem Nutzer, welcher ein Brennstoffzellenfahrzeug der Mittelklasse fährt. Die durchschnittliche Verbrauchsangabe wird folglich nur als Anhaltspunkt gewertet. Mit einer Übereinstimmung von 94,1 % zeigt sich dennoch, dass der Verbrauch der Flotte auch hier als realistisch eingestuft werden kann, da die Mittelklasse einen dominierenden Anteil der Flottenfahrleistung, 68,5 %, repräsentiert. Der durchschnittliche Energiebedarf der 256 Fahrzeughalter der Batterievarianten liegt in dem Vergleich zu der simulierten Flotte bei 90 %. Die erhöhte Abweichung ist durch eine fehlende Durchdringung aller Fahrzeugklassen begründbar. Während in dem Betrachtungsjahr 2015 das erste Segment bereits viele Elektrofahrzeuge aufweist, sind in dem zweiten Segment vor allem Mittelklassevarianten als reine Batteriefahrzeuge existent. Größere Fahrzeugvarianten, wie beispielsweise ein SUV-Derivat, sind zu diesem Zeitpunkt nicht als reines BEV elektrifiziert. Größere und schwere Segmentklassen sind folglich nicht in die reale Durchschnittsbildung mit eingeflossen. Der aus den realen Angaben ermittelte Energiebedarf des zweiten Segments des BEVs fällt somit zu gering aus. In dem dritten Segment sind zu dem Erhebungszeitpunkt in der Datenbank ausschließlich Verbrauchsangaben verschiedener Modelle der Firma Tesla Inc. präsent. Für eine Plausibilisierung der simulierten Energiebedarfe wird eine segmentspezifische Analyse der dedizierten Verbrauchswerte durchgeführt. Dabei zeigt sich für das erste Segment eine Übereinstimmung von 97,9 %, für das zweite Segment 82,8 % und für das dritte Segment 94,1 %. Wird die Steigerung der Realangaben der Segmente verglichen, wird deutlich, dass die Angabe in dem zweiten Segment auf-

grund der beschriebenen, fehlenden Marktdurchdringung zu niedrig ausfällt. Da der Anteil der Fahrleistung des zweiten Segments signifikant, 68,5 %, ist, spiegelt sich der reduzierte Verbrauchswert in dem durchschnittlichen Flottenverbrauch verstärkt wider. Wird angenommen, dass bei einer vollen Marktdurchdringung das Verhältnis des zweiten Segments dem Mittelwert der Übereinstimmung des ersten und des dritten Segments entspricht, 96,0 %, ergibt sich eine Deckung des Energiebedarfs der Flotte der Datenbank zu der Simulation von 96,2 %. Da prinzipiell bereits in dem ersten Segment und in dem dritten Segment gezeigt wurde, dass die simulierten Verbrauchswerte der Segmente mit den realen Angaben gut übereinstimmen, wird der simulierte, gesamtheitliche Flottenverbrauch trotz einer Abweichung von 10 % als valide erachtet.

Sowohl das Zertifizierungsprofil als auch die Berücksichtigung der Nebenverbraucher und des Fahrverhaltens wirken sich auf die verschiedenen Antriebsvarianten unterschiedlich aus. In der Tabelle 6-2 sind deshalb die relativen Verbrauchswerte der Antriebsvarianten in dem NEFZ zueinander und der Tabelle 6-3 jene unter den beschriebenen Flottenbedingungen herausgearbeitet. Die Reihenfolge der Antriebsvarianten, aufsteigend nach dem Energiebedarf, ändert sich durch eine Berücksichtigung des Nebenverbrauchs nicht. Diese ist, wie in dem Zertifizierungszyklus, BEV, FC-REEV, FC-PHEV, FCEV, ICE-D- und ICE-B-Fahrzeug. Bei einer Berücksichtigung der Nebenverbraucher reduziert sich der relative Abstand der Antriebsvarianten zu dem BEV, da unter anderem für das BEV des Betrachtungsjahrs 2015 eine Möglichkeit der Abwärmenutzung fehlt. Das Verhältnis der Energieverbräuche des FCEVs zu dem BEV ist in dem NEFZ beispielsweise noch 163,4 %, während dieses unter der Berücksichtigung des Einflusses der Nebenverbraucher nur noch 152,8 % beträgt. Prinzipbedingt sinkt das Verhältnis des BEV Energiebedarfs zu der jeweiligen anderen Antriebsart, je stärker die Abwärmenutzung des anderen Antriebs ausfällt und je höher der Verbrauchswert ohne Nebenverbraucher ist, ab.

Tabelle 6-2 Vergleich des rel. Energiebedarfs der Antriebsstrangvarianten in dem NEFZ

Rel. Energiebedarf NEFZ	BEV	FC-REEV	FC-PHEV	FCEV	ICE-G-Fzg	ICE-D-Fzg
BEV	100,0 %	116,4 %	123,4 %	163,4 %	346,0 %	334,4 %
FC-REEV	85,9 %	100,0 %	106,0 %	140,3 %	297,2 %	287,2 %
FC-PHEV	81,1 %	94,4 %	100,0 %	132,4 %	280,4 %	271,1 %
FCEV	61,2 %	71,3 %	75,5 %	100,0 %	211,8 %	204,7 %
ICE-G-Fahrzeug (Fzg)	28,9 %	33,7 %	35,7 %	47,2 %	100,0 %	96,7 %
ICE-D-Fahrzeug (Fzg)	29,9 %	34,8 %	36,9 %	48,9 %	103,5 %	100,0 %

Tabelle 6-3 Vergleich des rel. Energiebedarfs der Antriebsstrangvarianten mit den Mobilitätsdaten einer deutschen Privat-Pkw-Flotte

Rel. Energiebedarf Flotte	BEV	FC-REEV	FC-PHEV	FCEV	ICE-G-Fzg	ICE-D-Fzg
BEV	100,0 %	113,4 %	115,8 %	152,8 %	295,1 %	293,5 %
FC-REEV	88,2 %	100,0 %	102,1 %	134,7 %	260,2 %	258,8 %
FC-PHEV	86,4 %	98,0 %	100,0 %	132,0 %	254,9 %	253,5 %
FCEV	65,5 %	74,2 %	75,8 %	100,0 %	193,2 %	192,1 %
ICE-G-Fahrzeug (Fzg)	33,9 %	38,4 %	39,2 %	51,8 %	100,0 %	99,5 %
ICE-D-Fahrzeug (Fzg)	34,1 %	38,6 %	39,4 %	52,0 %	100,6 %	100,0 %

Bei der durchgeführten Flottenbetrachtung wird das typisch deutsche Mobilitätsverhalten für die Analyse des Einflusses der Nebenverbraucher herangezogen. Dabei werden die unterschiedlichen Startzeiten, Fahrtlängen und Streckentypen nach der Fahrleistungsverteilung gewichtet. Die verschiedenen Fahrdaten stammen dabei aus der in dieser Arbeit durch die Simulation geschaffenen Datenbank. Mit den unterschiedlichen Ausgangsbedingungen und den Streckenprofilen ist neben einer Flottenbetrachtung auch eine individuelle Untersuchung nutzerspezifischer Mobilitätsverhalten möglich. Diese wird folgend exemplarisch für die Nutzerprofile Kurstrecken-, Mittelstrecken- und Langstreckenfahrer durchgeführt.

6.1.4 Nutzerprofile

Durch die Simulation unterschiedlicher Fahrprofile, Fahrtantrittszeiten, Fahrzeuggrößen und Antriebsvarianten wurde eine Datenbasis geschaffen, welche es ermöglicht unterschiedliche Nutzerprofile und Fahrzeugvarianten hinsichtlich des Energiebedarfs nutzerspezifisch zu analysieren und zu bewerten. Für eine Analyse der nutzungsspezifischen Energieumsetzung, müssen lediglich fahrsituationsabhängige Verbräuche unterschiedlicher Nutzer verglichen, oder ein definiertes Nutzerprofil anhand verschiedener Antriebsvarianten bewertet werden. Die Tabelle 6-4 enthält, für eine beispielhafte Untersuchung des Einflusses des Nutzerverhaltens, drei unterschiedliche Nutzerprofile. Der darin enthaltene Kurzstreckenfahrer (KSF) spiegelt ein Fahrverhalten in einer Stadt mit einer acht Kilometer langen Fahrt an dem Morgen und an dem Nachmittag in die Arbeit bzw. zu dem Wohnort und einer abendlichen Fahrt mit einer Distanz von zwei Mal zwei Kilometern wider. Das Profil des Mittelstreckenfahrers (MSF) repräsentiert eine 25 Kilometer lange Außerortsfahrt vormittags und nachmittags von Montag bis Freitag, beispielsweise zu der Arbeit und von der Arbeit, und eine vier Kilometer lange Innerortsfahrt hin und zurück, beispielsweise eine Fahrt zu einem Supermarkt. Der Langstreckenfahrer (LSF) absolviert täglich eine Autobahnfahrt mit einer Länge von 50 Kilometern an dem Morgen und an dem Nachmittag. Zudem legt dieser einmal pro Woche eine, in eine Richtung, zehn Kilometer lange Strecke in einem Außerortsprofil zurück. Die drei Nutzerprofile werden, wie definiert, gewählt, um ein breites Spektrum verschiedener Fahrprofile beispielhaft abzubilden.

Tabelle 6-4 Definition der Nutzerprofile Kurz-, Mittel- und Langstreckenfahrer

Fahrt	Fahrt 1	Fahrt 2	Fahrt 3
Startzeit	Morgen	Nachmittag	Abend
Fahrverhalten	Montag bis Freitag	Montag bis Freitag	Einmal die Woche
Kurzstreckenfahrer	8 km Innerorts	8 km Innerorts	2 km Innerorts
Mitteldistanzfahrer	25 km Außerorts	25 km Außerorts	4 km Innerorts
Langstreckenfahrer	50 km Autobahn	50 km Autobahn	10 km Außerorts

Die Abbildung 6-17 auf der Seite 190 visualisiert die Ergebnisse der Nutzerbetrachtung für a) das Segment 1, b) das Segment 2 und c) das Segment 3. An der Ordinate der Diagramme ist der Energiebedarf pro einhundert Kilometer in der Einheit kWh/100 km und an der Abszisse sind die drei Nutzerprofile, KSF, MSF und LSF, aufgetragen. Die Resultate für die sechs Antriebsvarianten sind pro Fahrscenario als Balken dargestellt. Dabei ist neben dem absoluten Verbrauchswert das Verhältnis des Energiebedarfs in Bezug zu dem jeweiligen Energiebedarf des BEVs in Prozent herausgearbeitet.

Werde die drei **Segmente untereinander verglichen**, ist nahezu immer eine Steigerung des absoluten Energiebedarfs erkennbar. Eine Ausnahme davon stellt lediglich die FC-PHEV- und die FC-REEV-Variante in dem Profil LSF dar. Hierbei erhöht sich die rein batterieelektrische Reichweite über die Segmente hinweg und ein gesteigerter Fahrleistungsanteil wird alleinig in dem CD-Modus absolviert. Die Erhöhung der rein batterieelektrischen Fahrstrecke hat zu der Folge, dass der Energiebedarf in dem Vergleich zu dem kombinierten Betrieb sinkt. Sofern lediglich ein Energiewandler für die Leistungsbereitstellung vorhanden ist, steigt der Energiebedarf in dem Vergleich der Segmente an.

Werden anstatt der Segmente die **Fahrprofile betrachtet**, fällt auf, dass für alle Antriebsvarianten das Profil des MSFs den niedrigsten Verbrauch, bezogen auf einhundert Kilometer, aufweist. Der geringe Energiebedarf basiert auf den, in dem Kapitel 6.1.2 herausgearbeiteten, Rahmenbedingungen – moderate Fahrwiderstände, verbrauchseffiziente Lastpunkte, eingeschwungene Leistung der Nebenverbraucher, verbesserten Komponenteneigenschaften und, überwiegend geltend für konventionelle Antriebe, eine reduzierte Anzahl an Standphasen und Abbremsvorgängen. Bei den beiden anderen, analysierten Fahrscenarien, KSF und LSF, kann keine pauschale Aussage bzgl. des nächst effizientesten Nutzerprofils getroffen werden. Je nach Segmentklasse und Antriebsvariante ist dies unterschiedlich. Die verschiedenen Einflüsse und die resultierende Reihenfolge werden folgend diskutiert.

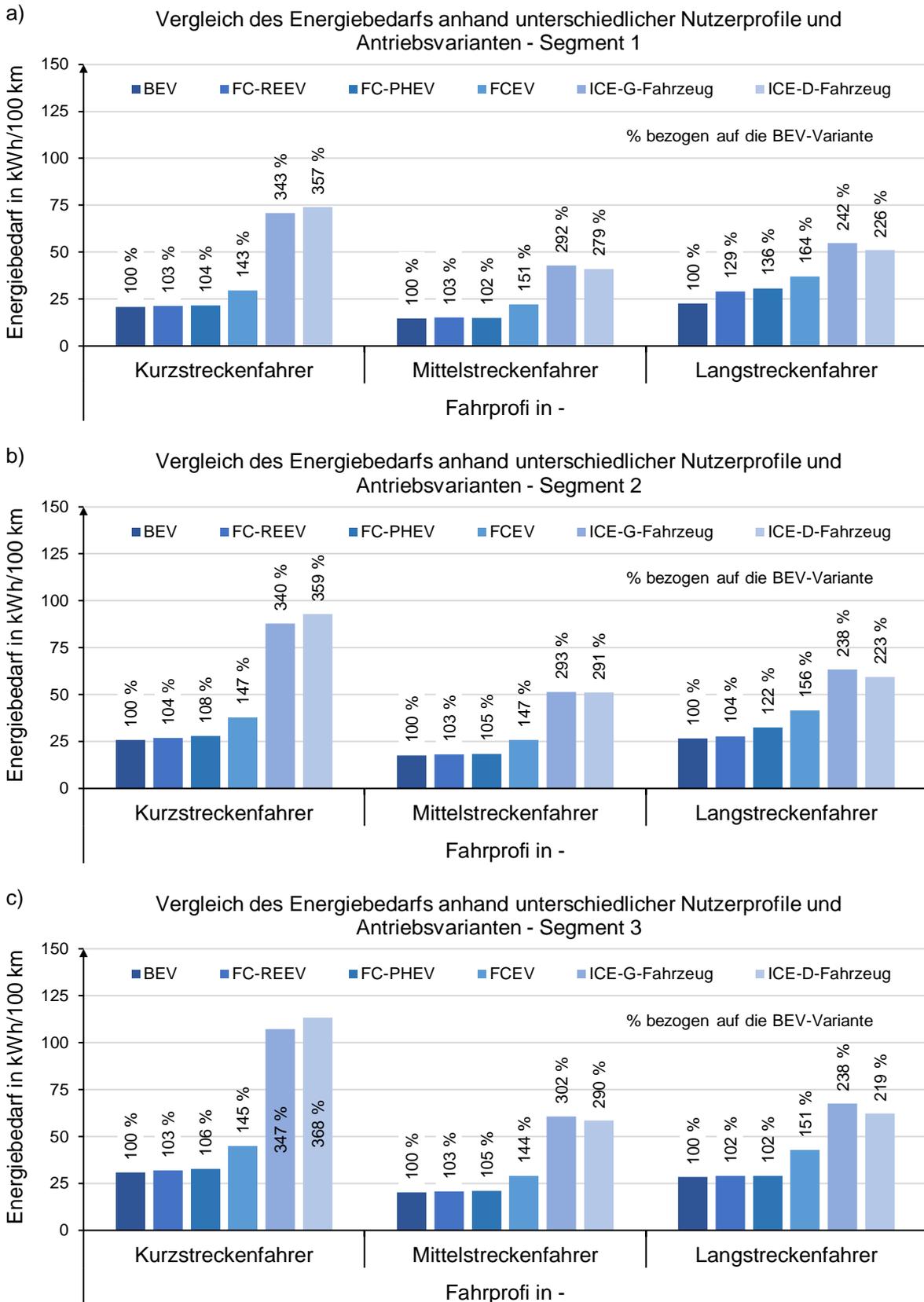


Abbildung 6-17 Vergleich des Energiebedarfs anhand unterschiedlicher Nutzerprofile und Antriebsvarianten a) in dem Segment 1, b) in dem Segment 2 und c) in dem Segment 3

Bei einer Analyse der konventionellen Antriebe zeigt sich, dass der relative Mehrbedarf gegenüber der Batterievariante in dem Profil KSF am signifikantesten ist. Das Verhältnis des Energiebedarfs zu dem BEV reduziert sich über den MSF zu dem LSF merklich. Es wird deutlich, dass der höchste Energiebedarf pro einhundert Kilometer in dem Innerortsprofil benötigt wird. Die vergleichbare, hohe Differenz in dem Szenario KSF resultiert neben einem generellen Wirkungsgradunterschied der Antriebsvarianten unter anderem aus einer fehlenden Möglichkeit einer Rückgewinnung der kinetischen Energie, Rekuperation, und einem, bezogen auf einhundert Kilometer, merklichen Verbrauch in dem Leerlauf-Betrieb, sofern die initialen Bedingungen für eine Start-Stopp-Phase noch nicht erreicht sind. Aufgrund einer geringen Fahrstrecke in dem Profil KSF ist auch Letzteres oft zutreffend. Eine fehlende Start-Stopp-Ausnutzung kann bei einer Betrachtung der relativen Verbrauchswerte über den Fahrzeugsegmenten nicht identifiziert werden. Obwohl für die Variante des ersten Segments keine Start-Stopp-Automatik für das Betrachtungsjahr 2015 berücksichtigt wird, sinken die relativen Angaben des zweiten Segments und jener des dritten Segments nicht. Ineffiziente Lastpunkte, sowie eine längere Aufwärmphase der größeren Motoren in dem Profil KSF sind dafür verantwortlich. In dem Profil MSF und in jenem des LSFs reduziert sich der Brems- und der Standanteil und die Betriebspunkte während der Fahrt sind in einem verbrauchseffizienteren Lastspektrum. Folglich verringert sich der relative Mehrverbrauch gegenüber dem BEV merklich. Bei den FCEV-Fahrzeugen steigt dieser in dem Profil LSF an. Die auftretende Erhöhung resultiert aus einer Verschiebung des Betriebspunkts des Brennstoffzellensystems aufgrund von temporär konstant geforderten, hohen Leistungen. Je größer das Batterie- und das Brennstoffzellensystem ausgelegt sind, desto niedriger fällt der relative Mehrbedarf aus. Diese Gegebenheit resultiert aus einer länger möglichen Glättung einer temporär erhöhten Leistungsanforderung durch eine größere Batterie und einer effizienteren Lastpunktverschiebung eines größeren Brennstoffzellensystems. Insgesamt ist für die alternativen Antriebsvarianten in dem Segment 1 und in dem Segment 2 das Profil LSF das verbrauchsineffizienteste. In dem Segment 3 ist dies nicht zutreffend. Hier besitzt der KSF einen leicht erhöhten, absoluten Energiebedarf auf 100 Kilometer. Der Wechsel des Nutzerprofils mit dem höchsten Energiebedarf in dem dritten Segment hin zu dem KSF liegt an einer gleichzeitigen Verringerung der Fahrwiderstände, niedriger c_w -Wert und verkleinerte Stirnfläche, und den, durch leistungsstarke Elektromotoren, energieineffizienten Lastpunkten in dem Teillastprofil.

Für eine Bewertung des ermittelten, **nutzerspezifischen Verbrauchs in dem Vergleich zu den Zertifizierungswerten** wird in der Tabelle 6-5 eine Übersicht gegeben. In dieser ist der relative Energiebedarf der Antriebsvarianten für die drei Segmente und Nutzerszenarien eingetragen.

Tabelle 6-5 Rel. Verbrauch verschiedener Nutzerprofile gegenüber dem Zertifizierungsverbrauch 2015

Antriebsvariante		BEV	FC-REEV	FC-PHEV	FCEV	ICE-G-Fahrzeug	ICE-D-Fahrzeug
SEG 1	Kurzstreckenfahrer	174,5 %	148,4 %	145,1 %	152,8 %	167,3 %	185,8 %
	Mitteldistanzfahrer	124,0 %	105,0 %	101,3 %	114,5 %	101,2 %	103,2 %
	Langstreckenfahrer	190,3 %	202,2 %	206,9 %	191,2 %	129,1 %	128,1 %
SEG 2	Kurzstreckenfahrer	186,9 %	167,5 %	162,7 %	167,1 %	182,2 %	201,1 %
	Mitteldistanzfahrer	127,2 %	113,5 %	107,9 %	114,0 %	106,9 %	110,8 %
	Langstreckenfahrer	192,6 %	172,8 %	190,5 %	183,3 %	131,4 %	128,7 %
SEG 3	Kurzstreckenfahrer	190,7 %	178,7 %	172,9 %	173,5 %	215,7 %	208,6 %
	Mitteldistanzfahrer	124,5 %	116,2 %	110,8 %	112,3 %	122,4 %	107,5 %
	Langstreckenfahrer	175,6 %	162,2 %	153,0 %	165,5 %	136,2 %	114,4 %

Aus der dargestellten Tabelle ist zu entnehmen, dass sich für das Szenario des KSF ein minimaler Mehrbedarf von 45,1 % und ein maximaler, zusätzlicher Verbrauch von 115,7 % ergeben. In dem Durchschnitt, über die Segmente und die Antriebsvarianten, liegt der relative Energiebedarf des Fahrprofils Innerorts bei 176,8 %. Die festgestellten, erhöhten Verbrauchswerte resultieren aus einem hohen Anteil der Nebenverbraucher, vielen Standphasen, sowie ineffizienten Lastpunkten in dem Innerortsprofil als

auch aus einem erhöhten Einfluss der anfänglichen Komponenteneigenschaften, beispielsweise erhöhten Reibleistungen. Bei dem angenommenen Fahrprofil des MSFs ist die Steigerung des Energiebedarfs gegenüber den erzielten Zertifizierungswerten deutlich niedriger. Maximal beträgt der Mehrbedarf 27,2 %, durchschnittlich 12,4 % und minimal 1,2 %. Der niedrige Anstieg des Energiebedarfs beruht auf einem reduzierten Einfluss der Nebenverbraucher, wenigen Standphasen und effizienten Betriebspunkten in dem Fahrprofil Außerorts. Zudem ist der Einfluss initialer Komponenteneigenschaften niedriger. Bei einem Vergleich der Verbrauchswerte des LSFs gegenüber den Zertifizierungswerten erhöht sich das Verhältnis wiederum deutlich. Minimal werden 14,4 %, in dem Durchschnitt 64,1 % und maximal 106,9 % mehr Energie benötigt. Der Anstieg des zusätzlichen Energiebedarfs resultiert hauptsächlich aus hohen Fahrwiderständen und den daraus resultierenden Lastspektren.

Werden die verschiedenen Fahrprofile anhand der Segmente analysiert, wird für das Profil des **Kurzstreckenfahrers** durchgehend eine Steigerung von der kleinen zu der großen Fahrzeugklassenvariante festgestellt. Bei den ICE-G-Fahrzeug-Ausführungen steigt der Energiebedarf beispielsweise von 167,3 % in dem Segment 1 auf 215,7 % in dem Segment 3 an. Eine Erhöhung zusammen mit der Segmentgröße beruht überwiegend sowohl auf ineffizienten Lastpunkten in dem analysierten Fahrprofil und gestiegenen Nebenverbraucherleistungen aufgrund größerer, thermischer Massen der Komponenten und der Fahrgastzelle als auch auf einem gestiegenen Einfluss anfänglicher Eigenschaften und deren Auswirkungen auf die angewandte Betriebsstrategie, beispielsweise einem Einsatz der Start-Stopp-Automatik.

Bei einer Untersuchung der relativen Verbrauchswerte des angenommenen Szenarios des **Mittelstreckenfahrers** in Abhängigkeit der Segmentklassen zeigt sich ein etwa gleichbleibender Einfluss für die Antriebsvarianten BEV und FCEV, eine Steigerung des Verhältnisses für die FC-REEV-, die FC-PHEV- und die ICE-G-Fahrzeug-Varianten und ein Anstieg von dem Segment 1 auf das Segment 2 als auch eine Verringerung von dem Segment 2 auf das Segment 3 bei den ICE-D-Fahrzeug-Ausführungen. Die in etwa gleichbleibenden Verhältnisse über den Fahrzeugklassen der BEV- und der FCEV-Derivate wird mit einem nahezu identischen Energiebedarf ohne den Einfluss der Nebenverbraucher in dem Fahrprofil NEFZ und in dem Zyklus Artemis Außerorts, vgl. hierzu Kapitel 6.1.1, und einem somit überwiegend von dem Nebenverbrauch und von den Umgebungsbedingungen abhängigen relativen Verbrauchswert begründet. Der festgestellte Mehrbedarf der BEVs liegt bei etwa 25 % und jener der FCEVs bei etwa 14 %. Die Steigerung des relativen Mehrbedarfs über den Segmenten der FC-REEV- und der FC-PHEV-Varianten lässt sich wie folgt begründen. Bei den FC-REEVs und bei den FC-PHEVs ist in dem, nach der ECE R 101 berechneten, kombinierten Zertifizierungszyklus eine fest definierte Wegstrecke in dem CS-Modus berücksichtigt. In den angewandten Fahrprofilen, KSF, MSF und LSF, wird hingegen angenommen, dass die Fahrten jeweils mit einem nahezu vollständig geladenen Batteriesystem stattfinden. Basierend auf einer daraus resultierenden, erhöhten rein batterieelektrischen Reichweite ergibt sich ein niedriger Energiebedarf. Mit steigender Fahrzeuggröße nimmt die rein batterieelektrisch fahrbare Reichweite zu, während die CS-Reichweite in der Richtlinie ECE R 101 als fester Wert angenommen ist. Daraus resultierend verringert sich der Einfluss einer größtenteils reinen batterieelektrischen Absolvierung des Fahrprofils MSF über den Segmenten. Der relative Energiebedarf ist für eine FC-REEV- bzw. für eine FC-PHEV-Variante des ersten Segments 105,0 % bzw. 101,3 %, des zweiten Segments 113,5 % bzw. 107,9 % und für die dritte Fahrzeugklasse 116,2 % bzw. 110,8 %. Aufgrund einer geringeren, rein elektrischen Reichweite der PHEV-Varianten ist der Einfluss einer in dem Fahrprofil erhöht gewichteten rein batterieelektrischen Reichweite verstärkt ausgeprägt. Resultierend ergibt sich ein niedrigerer, relativer Mehrbedarf bei der Berücksichtigung der Fahrprofile. Bei den ICE-G-Fahrzeug-Derivaten steigt der Einfluss der Nebenverbraucher über den Segmenten ebenfalls an. In der Fahrzeugvariante des ersten Segments ist für das Betrachtungsjahr 2015 keine Start-Stopp-Automatik vorgesehen. In den Standphasen der Fahrprofile läuft somit der Motor. Da in dem Gegensatz zu dem Fahrprofil Artemis Außerorts der Anteil der Standzeiten in dem NEFZ vermehrt ist, ergibt sich ein erhöhter Verbrauch ohne den Einfluss der Nebenverbraucher, vgl. Kapitel 6.1.1. Ein Mehrbedarf in dem Fahrprofil MSF fällt darauf basierend geringer aus. Ab dem zweiten Segment des

Betrachtungsjahrs 2015 wird angenommen, dass eine Start-Stopp-Automatik verbaut ist. Der zuvor beschriebene Effekt ist dadurch teilweise obsolet und der relative Mehrbedarf erhöht sich von 101,2 % in dem Segment 1 auf 106,9 % in dem Segment 2. In dem Vergleich des Segments 2 zu dem Segment 3 fällt eine deutliche Erhöhung des relativen Energiebedarfs auf 122,4 % auf. Diese Steigerung lässt sich durch einen äußerst effizienten NEFZ-Verbrauch der ICE-G-Fahrzeug-Variante in der dritten Fahrzeugklasse erklären, vgl. hierzu Kapitel 6.1.1. Bei den ICE-D-Fahrzeug-Ausführungen lässt sich für die ersten beiden Segmente ein ähnliches Verhalten feststellen. Der relative Energiebedarf des Fahrprofils MSF ist hier 103,2 % bzw. 110,8 %. In dem dritten Segment sinkt der relative Verbrauchswert in dem Vergleich zu dem zweiten Segment und beläuft sich auf 107,5 %. In dem Gegensatz zu der Benzin-Variante des dritten Segments ist der simulierte Verbrauch in dem NEFZ der dritten Fahrzeugklasse mit einem Dieselmotor gegenüber den Realangaben der Pkws pessimistischer, vgl. Abbildung 6-2 c) auf der Seite 164. Der relative Mehrbedarf fällt dadurch folgerichtig geringer aus.

Bei dem Fahrprofil **Langstreckenfahrer** nimmt der Einfluss bei vielen Antriebsvarianten über den Segmenten ab. Ausschließlich bei dem ICE-G-Fahrzeug, bei dem ICE-D-Fahrzeug und bei dem BEV bleibt der relative Mehrbedarf vom ersten Segment zu dem zweiten Segment nahezu identisch und nur bei dem ICE-G-Fahrzeug steigt dieser von der zweiten Fahrzeugklasse zu der dritten Fahrzeugklasse an. Letzteres lässt sich durch einen in dem Vergleich zu den Realangaben äußerst niedrigen Verbrauchswert des dritten Segments in dem NEFZ erklären. In den restlichen Szenarien nimmt der relative Energiebedarf über den Segmenten ab. Dies ist mit verbesserten Lastpunkten in dem analysierten Langstreckenprofil und, speziell in dem dritten Segment, mit einem niedrigen c_w -Wert und einer geringen Stirnfläche und somit einem niedrigen Luftwiderstand erklärbar.

6.2 Prognosejahr 2025

Für die Analyse des Energiebedarfs für das Prognosejahr 2025 werden die beiden Antriebsvarianten BEV und FCEV herangezogen. Für die Betrachtung wird angenommen, dass sich die Fahrzeug-, die Komponenten- und die Thermomanagementeigenschaften, wie in dem Kapitel 3 und in dem Kapitel 5 beschrieben, entwickeln. Da es sich hierbei um Annahmen handelt, stellen die folgenden Ergebnisse ausschließlich Szenarien dar. Bei der Untersuchung des Energiebedarfs für das Prognosejahr 2025 wird analog dem Vorgehen der Evaluierung für das Betrachtungsjahr 2015 vorgegangen. Zunächst werden unterschiedliche Zyklen ohne den Einfluss der Nebenverbraucher analysiert und folgend der Bedarf unter dessen Berücksichtigung für die Artemiszyklen Innerorts, Außerorts und Autobahn für verschiedene Jahreszeiten betrachtet. Während für die Beurteilung des zyklusabhängigen Energiebedarfs alle drei Segmentklassen miteinbezogen werden, wird für die saisonale Analyse lediglich die Variante der Mittelklasse simuliert. Des Weiteren wird für das Szenario „Prognosejahr 2025“ ausschließlich die Klimaregion Deutschland untersucht. Eine Diskussion des Einflusses verschiedener Startbedingungen und extremer Randbedingungen wird für das Prognosejahr 2025 nicht evaluiert.

6.2.1 Fahrzyklus

Die Analyse des Einflusses der verschiedenen Fahrzyklen auf den Energiebedarf der Antriebsvarianten BEV und FCEV für das Prognosejahr 2025 erfolgt nahezu analog den Rahmenbedingungen des Betrachtungsjahrs 2015. Lediglich für den Wirkungsgrad bei dem Laden des Fahrzeugs wird eine Steigerung von 85 % auf 90 % angenommen und für den Zertifizierungszyklus wird anstatt des NEFZs der WLTC herangezogen. Die Abbildung 6-18 fasst in einem Säulendiagramm die Ergebnisse für alle drei Segmente zusammen. Auf der Ordinate der Darstellung ist der Energiebedarf in der Einheit kWh/100 km und auf der Abszisse sind die Fahrzyklen aufgetragen. Die Balkenhöhe spiegelt dabei den absoluten Verbrauchswert in dem korrespondierenden Zyklus wider. Für eine optimierte Vergleichbarkeit ist zudem über den FCEV-Balken der relative Verbrauch der Brennstoffzellenvariante bezogen auf das Batteriefahrzeug des gleichen Segments visualisiert. Folgend werden die dargestellten Ergebnisse sowohl anhand der Antriebsvariante und anhand des Fahrzykluses als auch in dem Vergleich zu den Verbrauchswerten in dem Betrachtungsjahr 2015 diskutiert.

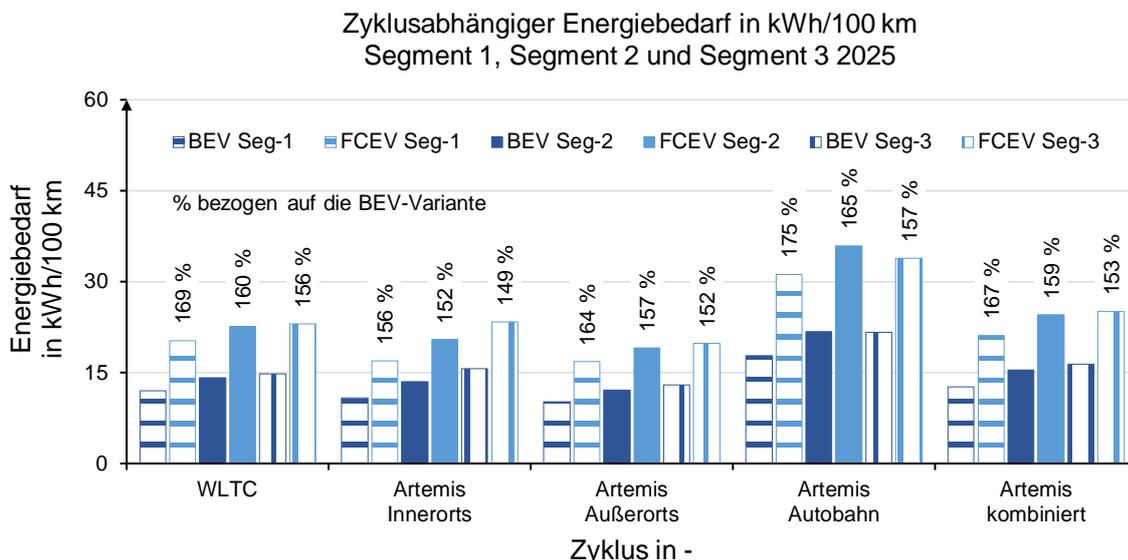


Abbildung 6-18 Vergleich des zyklusabhängigen Energiebedarfs der Segmente 1 bis 3 und der Antriebsvarianten Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug in dem Prognosejahr 2025

Als Erstes wird der **Energiebedarf der Antriebsstrangvarianten** verglichen. In diesem Zusammenhang fällt auf, dass das Brennstoffzellenderivat stetig einen höheren Verbrauchswert aufweist. In dem ersten Segment liegt der Mittelwert über den Zyklen bei etwa 66 %, in dem zweiten Segment bei etwa 59 % und in dem dritten Segment bei etwa 54 %. Mit größer werdender Fahrzeugklasse nimmt die

relative Abweichung somit ab. Für diese Annäherung sind zu dem einen die erhöhten Absolutwerte der Verbrauchswerte und zu dem anderen die steigende Anforderung der fahrbaren Reichweite in dem Zertifizierungszyklus, durch eine unterschiedliche Entwicklung der spezifischen Energiedichte des Wasserstofftank- und des Batteriesystems, verantwortlich. Während bei einem Brennstoffzellenfahrzeug lediglich ein oder mehrere Wasserstoffspeicher vergrößert oder hinzugefügt werden müssen und die BoP nahezu konstant gehalten wird, muss bei einem Batteriefahrzeug für eine erhöhte Reichweite die Batteriekapazität mindestens in dem selben Verhältnis der Reichweiten ansteigen. Da die Energiedichte des Wasserstofftanksystems mit größerer Speicherkapazität sich somit tendenziell verbessert, während jene des Batteriesystems nahezu konstant bleibt, verändert sich die Massendifferenz der beiden Antriebsvarianten und die relative Verbrauchsdifferenz nimmt ab. Absolut betrachtet, erreicht die BEV-Ausführung minimal 10,2 kWh/100 km (Segment 1 Artemis AO) und maximal 21,8 kWh/100 km (Segment 2 Artemis AB), während die FCEV-Variante minimal 16,8 kWh/100 km (Segment 1 Artemis AO) und maximal 35,9 kWh/100 km (Segment 2 Artemis AB) erzielt.

Wird der **Einfluss der Fahrzyklen auf den Energiebedarf** analysiert, wird festgestellt, dass für alle Antriebsvarianten, analog zu dem Betrachtungsjahr 2015, das Fahrprofil Artemis Außerorts am energieeffizientesten absolviert wird. Nach dem Energiebedarf steigend, folgt anschließend der Zyklus Artemis Innerorts, das Geschwindigkeitsprofil der Zertifizierung, der WLTC, und das Fahrprofil Artemis Autobahn. Mit steigender Fahrzeugklasse nimmt der Verbrauch, bis auf in dem Einzelfall des zweiten Segments auf das dritte Segment in dem Zyklus Artemis Autobahn, zu. In dem Letztgenannten reduziert sich der Energiebedarf pro einhundert Kilometer aufgrund eines stark reduzierten Luftwiderstands und dessen dominanten Anteils an dem Gesamtwiderstand in dem Fahrzyklus Artemis Autobahn. Werden die Energiebedarfswerte der Artemiszyklen mit dessen Fahrleistungsanteil analog der Studie [97] mit Innerorts 30 %, Außerorts 40 % und Autobahn 30 % gewichtet, wie bereits in dem Betrachtungsjahr 2015 angewandt, wird ein fahrleistungsgewichteter, kombinierter Artemisverbrauch festgestellt. Der gewichtete Energiebedarf ist für alle Segmente und alle Antriebsvarianten etwas höher als jener in dem Zertifizierungszyklus. Durchschnittlich liegt das Verhältnis fahrleistungsgewichteter, kombinierter Artemisverbrauch zu Zertifizierungsverbrauch bei ca. 108 %.

Für eine **Vergleichbarkeit** der ermittelten Energiebedarfswerte für das **Prognosejahr 2025 mit jenen des Betrachtungsjahrs 2015** ist das Verhältnis dieser in der Tabelle 6-6 dargestellt. Die Tabelle visualisiert für die Batteriefahrzeugvarianten das Verhältnis der Verbrauchswerte des Prognosejahrs 2025 zu dem Betrachtungsjahr 2015 mit und ohne Berücksichtigung des Ladewirkungsgrads (LW) und für das Brennstoffzellenfahrzeugvariant das Verhältnis Prognosejahr 2025 zu dem Betrachtungsjahr 2015.

Tabelle 6-6 Vergleich des Energiebedarfs 2025 mit 2015 in unterschiedlichen Zyklen

Energiebedarf 2025 / 2015	Zertifizierungszyklus*			Artemis Innerorts			Artemis Außerorts			Artemis Autobahn			Artemis kombiniert		
	SEG1	SEG2	SEG3	SEG1	SEG2	SEG3	SEG1	SEG2	SEG3	SEG1	SEG2	SEG3	SEG1	SEG2	SEG3
BEV ohne LW	107 %	108 %	97 %	93 %	95 %	85 %	89 %	91 %	83 %	91 %	92 %	85 %	91 %	92 %	84 %
BEV mit LW	101 %	102 %	91 %	87 %	89 %	81 %	84 %	86 %	78 %	86 %	87 %	80 %	86 %	87 %	80 %
FCEV	105 %	100 %	89 %	84 %	82 %	77 %	89 %	87 %	81 %	94 %	95 %	87 %	90 %	89 %	82 %

* 2015: NEFZ 2025: WLTC LW: Ladewirkungsgrad

Trotz einer steigenden Reichweitenanforderung für die Auslegung der Fahrzeugvarianten des Prognosejahrs 2025 sinkt der Energiebedarf in dem Vergleich mit jenem des Betrachtungsjahrs 2015 für fast alle Zyklen. Lediglich bei einer Betrachtung des Zertifizierungsverbrauchs für das Segment-1- und das Segment-2-Fahrzeug des BEVs und für das Segment-1-Fahrzeug des FCEVs erhöht sich die benötigte Energiemenge. Der Anstieg der Verbrauchswerte pro 100 Kilometer resultiert aus dem Wechsel des Zertifizierungszyklus von dem NEFZ zu dem WLTC. Das Geschwindigkeitsprofil des Fahrprofils des Prognosejahrs 2025 ist in dem Gegensatz zu jenem des Betrachtungsjahrs 2015 dynamischer und beinhaltet erhöhte Leistungsanforderungen. Für die restlichen Zyklen reduziert sich der Energiebedarf trotz einer geforderten Reichweiterehöhung und einer teilweise erhöhten Fahrzeugmassen (BEV Segment 1 und BEV Segment 2) aufgrund insgesamt sinkender Fahrwiderstände und der berücksichtigten

Effizienzsteigerung der Antriebsstränge. Bei dem BEV ist zudem der um 5 % gesteigerte Ladewirkungsgrad bemerkbar. Über die Fahrzyklen NEFZ/WLTC, Artemis Innerorts, Artemis Außerorts und Artemis Autobahn reduziert sich der Energiebedarf durchschnittlich für die Batterie- bzw. für die Brennstoffzellenvariante in dem ersten Segment auf 90 % bzw. auf 93 %, in dem zweiten Segment für beide Varianten auf 91 % und in dem dritten Segment auf 83 % bzw. auf 84 %. Die signifikanteste, relative Reduzierung erfolgt somit in dem größten Fahrzeugsegment. Dieser Effekt beruht, unter anderem, auf der höchsten Verringerung der Karosseriemasse und einem deutlicheren Einfluss der Komponentenentwicklung des Antriebsstrangs. Wird jener über der Fahrleistung gewichtete Energiebedarf der Artemiszyklen betrachtet, ist eine etwas höhere Reduzierung erkennbar. Dies resultiert sowohl aus einer höheren Gewichtung des Zyklus mit dem niedrigsten Verbrauch, dem Artemis Außerorts, als auch aus einer Vernachlässigung des Zertifizierungszyklus und dessen Wechsel des Fahrprofils.

Insgesamt wird für die Batterie- und für die Brennstoffzellenvarianten trotz gesteigerter Reichweitenanforderung eine Verbrauchsreduzierung durch gesunkene Fahrwiderstände und gestiegene Antriebseffizienzen festgestellt. Anzumerken ist dabei, dass die fahrbare Reichweite der Batteriefahrzeuge in dem Zertifizierungszyklus für das erste Segment um ca. 150 km und für das zweite und für das dritte Segment um ca. 100 km geringer als jene des Brennstoffzellenderivats ausfällt. Folglich sind nicht alle Fahrscenarien identisch fahrbar. Beispielsweise könnte bei einer Langstreckenfahrt unter dem Einfluss der Nebenverbraucher ein erneuter Stopp für das Aufladen des Batteriesystems benötigt werden. Das Batteriefahrzeug hätte in diesem Betrachtungsfall diesbezüglich Nachteile. Folgend wird deshalb der saisonale Energiebedarf unter deutschen Witterungsbedingungen für die drei Fahrprofile Innerorts, Außerorts und auf der Autobahn analysiert, um etwaige Szenarien zu bewerten.

6.2.2 Saisonaler Energiebedarf in Deutschland

Für die Analyse des saisonalen Energiebedarfs unter deutschen Wetterbedingungen der Antriebsvarianten BEV und FCEV für das Szenario Prognosejahr 2025 wird annähernd analog der Methodik für das Betrachtungsjahr 2015 vorgegangen. Als Startbedingung wird die Parksituation „Aufgewärmt“ herangezogen, ein Ladewirkungsgrad von 90 % wird angenommen und ein nahezu volles Batteriesystem für alle Fahrtantritte wird verwendet. Die Abbildung 6-20 auf der Seite 198 stellt die resultierenden Ergebnisse der Betrachtung dar. Diese werden folgend detailliert diskutiert.

In den Diagrammen a) bis f) sind die Innerorts-, die Außerorts- und die Autobahnergebnisse für die Antriebsvarianten BEV, a), c) und e), und FCEV, b), d) und f), zu sehen. Dabei ist analog zu der Feststellung aus der Analyse des Energiebedarfs für das Betrachtungsjahr 2015 erkennbar, dass der Zyklus Innerorts, gefolgt von dem Außerorts- und von dem Autobahnprofil, den höchsten Einfluss der Nebenverbraucher aufweist. Dies lässt sich, wie bereits für das Betrachtungsjahr 2015 detailliert beschrieben, hauptsächlich durch die niedrigste Durchschnittsgeschwindigkeit des Fahrzykluses und einen, auf einhundert Kilometer bezogenen, hohen Anteil der Nebenverbraucherleistung erklären. Zudem ist eine identische Reihenfolge des Einflusses der saisonalen Bedingungen feststellbar. In dem Winter wird aufgrund der geringsten Temperaturen ein ausgeprägter Heizbedarf benötigt. Zudem müssen die höchsten Fahrwiderstände mit den niedrigsten, initialen Komponenteneffizienzen überwunden werden. Aus diesen Gründen ist die kälteste Jahreszeit, auch für das Prognosejahr 2025, am energieintensivsten. Der Herbst und der Frühling sind, analog zu dem Betrachtungsjahr 2015, auf einem identischen Niveau. Der Energiebedarf der beiden Jahreszeiten liegt teilweise etwas über oder gleichauf mit den Verbrauchswerten des Sommers. Der Einfluss des Heizbedarfs fällt für die Brennstoffzellenvariante aufgrund einer, über der Fahrdauer nutzbar werdenden, Abwärme mit steigender Fahrstrecke geringer aus. Besonders in dem Innerortsprofil in dem Diagramm b) ist eine gesteigerte Gesamteffizienz deutlich erkennbar. Für das Batteriefahrzeug ist für das Szenario „Prognosejahr 2025“ ein Wärmepumpensystem implementiert. Mit diesem wird, bei einer ausreichenden Erwärmung der Kühlmittelkreisläufe, ebenfalls die Abwärme der Komponenten effizient genutzt. In dem Innerortsprofil ist dies jedoch nicht oder nur geringfügig feststellbar. Hierbei sind die benötigte Fahrleistung und die damit verbundene Verlustleistung nicht ausreichend, um eine Nutzung der Abwärme zu ermöglichen. Dennoch ist erkennbar, dass der initiale Energiebedarf aufgrund des modifizierten Thermomanagements, gegenüber dem Betrachtungsjahr 2015,

gering ausfällt. Der reduzierte Anfangsverbrauch resultiert aus der limitierten Leistung des elektrischen Luft-Heizers. Dieser ist auf zwei Kilowatt, vergleichbar einer konventionellen Ausführung, begrenzt und stellt somit initial weniger Wärme zu der Verfügung. In dem Vergleich zu dem Aufbau des Betrachtungs-jahrs 2015 wird deshalb eine geringere Energiemenge in dem betrachteten Zeitintervall umgewandelt. Aufgrund einer hohen Effizienz des Antriebsstrangs ist die Ausnutzung der Abwärme auch in dem Au-ßerorts- und in dem Autobahnprofil gemittelt über die Jahreszeiten nur schwer identifizierbar. Dies be-ruht, unter anderem, darauf, dass die Temperaturerhöhung der Kühlmittelkreisläufe erst während der Fahrt erfolgt und der Einschwingvorgang der Kabinenklimatisierung bzw. der Nebenverbraucherleistung bereits fortgeschritten ist, vgl. Abbildung 6-4 a) auf der Seite 168. Somit erfolgt ein Großteil der benö-tigten Energiemenge für das Temperieren der Fahrgastzelle elektrisch und eine mögliche Reduzierung des Energiebedarfs fällt, aufgrund des zu diesem Zeitpunkt dominanten Anteils der Fahrwiderstände, moderat aus. Anzumerken ist hierbei, dass dieses Verhalten stark abhängig von dem Aufbau und der angewandten Betriebsstrategie des Thermomanagements ist. Somit wirkt sich eine modifizierte Lösung oder eine angepasste Nutzung der Wärmepumpe stark unterschiedlich auf den Energiebedarf aus.

Für eine vereinfachte Analyse stellt die Abbildung 6-19 den Einfluss der Nebenverbraucher auf den Energiebedarf für verschiedene Stützstellen dar. In dieser ist das Verhältnis der Verbrauchswerte unter dem Einfluss der Wetterbedingungen zu jenem Verbrauchswert bei 25 °C und ohne zusätzliche Neben-verbraucher abgebildet. Auf der x-Achse ist für die drei Fahrprofile Artemis Innerorts, Artemis Außerorts und Artemis Autobahn jeweils die Streckenlänge bei 10 Minuten, 30 Minuten und bei 60 Minuten zu sehen. In den Stützstellen sind die Verbrauchswerte der Jahreszeiten Winter, Frühling, Sommer und Winter enthalten. In Dunkelblau sind die Ergebnisse für das BEV und in Hellblau jene für das FCEV abgebildet. Mit einer steigenden Fahrtdauer sinkt der Einfluss des zusätzlichen Energiebedarfs. Dies ist, wie bereits für das Betrachtungsjahr 2015, anhand des Einschwingvorgangs der Nebenverbraucher-leistung und der Fahrwiderstände erklärbar. Zudem visualisiert das Diagramm den Sachverhalt erneut, dass der relative, zusätzliche Energiebedarf absteigend nach der Reihenfolge wie folgt ausfällt: Artemis Innerorts, Artemis Außerorts und Artemis Autobahn. Auch hier erfolgt die Begründung analog dem Be-trachtungsjahr 2015. Aus niedrigeren Geschwindigkeiten und aus niedrigen Verbrauchswerten ohne den Einfluss der Nebenverbraucher resultiert eine hohe Abhängigkeit von diesen. Für das Prognose-jahr 2025 ist die erste Stützstelle in dem Fahrprofil Innerorts zusätzlich von besonderem Interesse. Bei dieser liegt das Verhältnis der Verbrauchswerte mit und ohne Nebenverbraucher in dem Gegensatz zu dem Betrachtungsjahr 2015 für das FCEV immer über jenem des BEVs. Diese Gegebenheit resultiert aus dem geänderten Thermomanagement des BEVs.

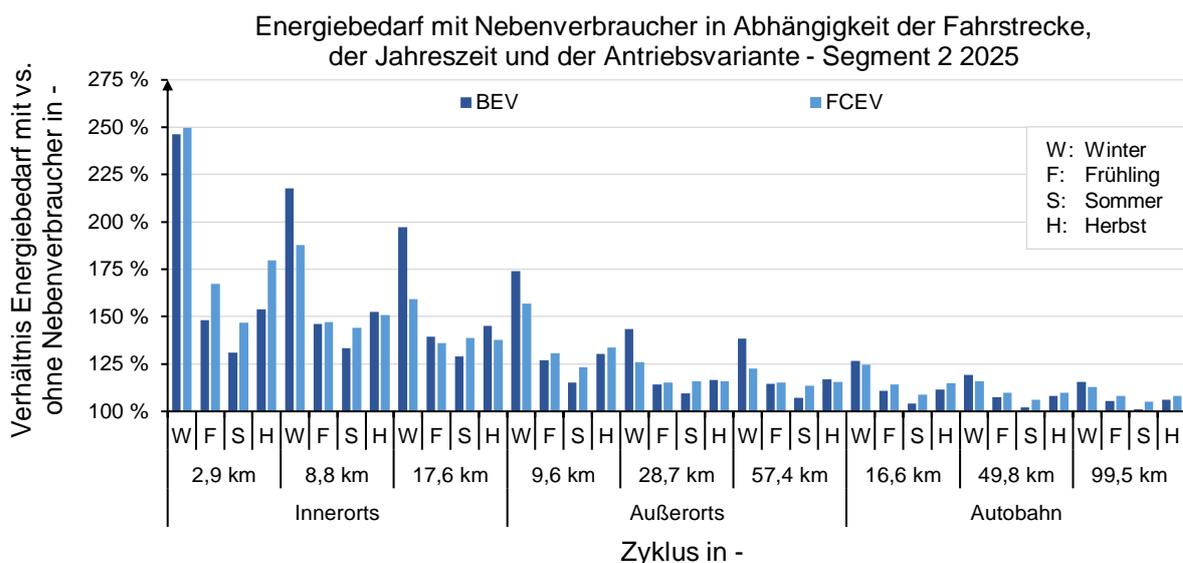


Abbildung 6-19 Verhältnis des Energiebedarfs mit vs. ohne Nebenverbraucher in Abhängigkeit der Fahr-strecke, der Jahreszeit und der Antriebsvariante Innerorts, Außerorts und auf der Autobahn in dem Prognosejahr 2025

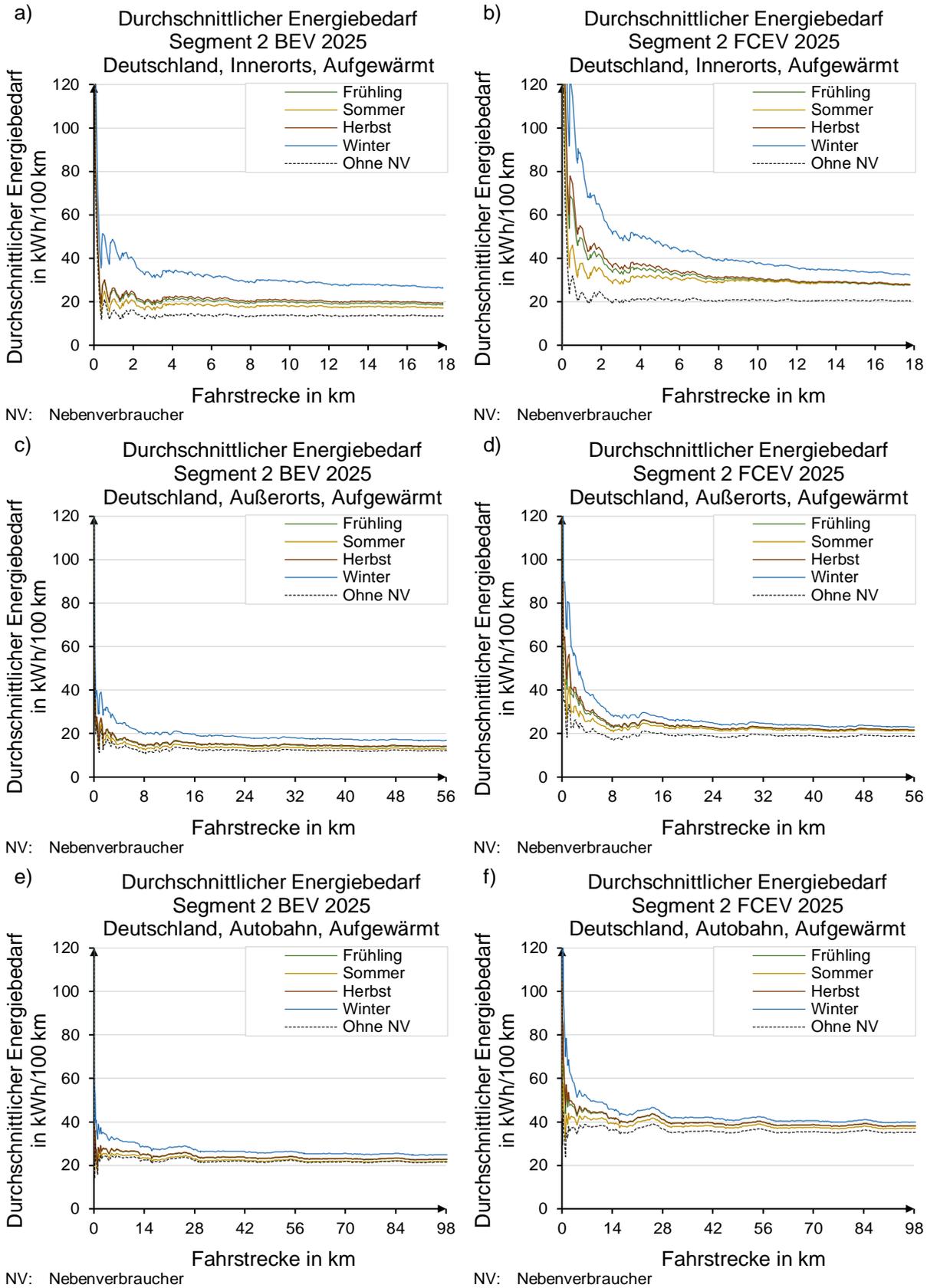


Abbildung 6-20 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des Mittelklassensegments unter verschiedenen Zyklen und unter deutschen Klimabedingungen a), c) und e) BEV und b), d) und f) FCEV

Wie bereits für das Betrachtungsjahr 2015 kann über die situativen Verbrauchswerte ein Nutzerprofil abgebildet und analysiert werden. In dem folgend wird dies für das Prognosejahr 2025 durchgeführt.

6.2.3 Fahrzeugflotte und Nutzerprofile

Nahezu analog zu dem Betrachtungsjahr 2015 wird der Einfluss einer Fahrzeugflotte mit einem typischen, deutschen Fahrverhalten und jener von verschiedenen Nutzerprofilen für die beiden Antriebsvarianten BEV und FCEV analysiert. Dazu wird zunächst der gewichtete Flottenverbrauch mittels der Verteilung der Fahrleistung des zweiten Segments 2 ermittelt und anschließend der Energiebedarf jener, in der Tabelle 6-4 auf der Seite 189, definierter Nutzerprofile, Kurzstrecken-, Mittelstrecken- und Langstreckenfahrer, festgestellt. Die Abbildung 6-21 stellt die resultierenden Ergebnisse der Analyse dar. In dieser sind sowohl die absoluten Werte des Energiebedarfs und die erzielbaren Reichweiten durch verschiedene Höhen der Balken als auch ein relativer Vergleich bezogen auf die Batteriefahrzeugvariante in Prozent in den Balken des FCEVs enthalten. Auf der linken Ordinate ist der Energiebedarf in der Einheit kWh/100 km und auf der rechten Ordinate ist die Reichweite in km aufgetragen. Das Fahrverhalten des Prognosejahrs 2025 wird identisch jenem des Betrachtungsjahrs 2015 angenommen, vgl. dazu Kapitel 6.1.3 und Kapitel 6.1.4. Folgend wird zunächst der Energiebedarf für das Prognosejahr 2025 diskutiert. Anschließend wird das Verhältnis zu dem Betrachtungsjahr 2015 untersucht und final wird der Einfluss des Energiebedarfs auf die Reichweite für das Prognosejahr 2025 analysiert.

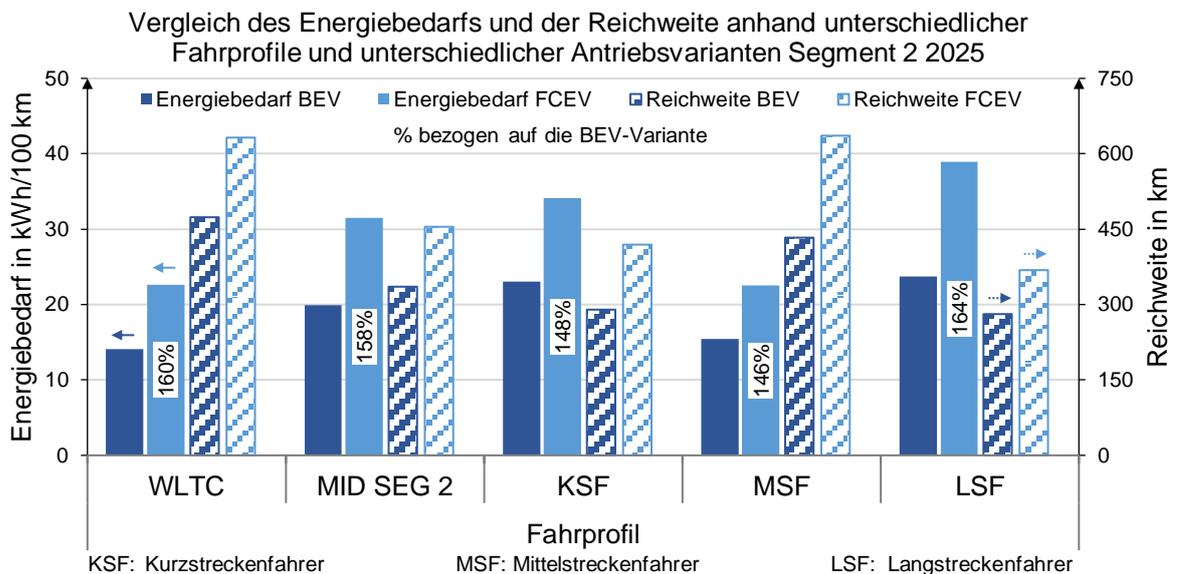


Abbildung 6-21 Vergleich des Energiebedarfs und der Reichweite anhand unterschiedlicher Fahrprofile und unterschiedlicher Antriebsvarianten in dem Segment 2 in dem Prognosejahr 2025

Mit etwas weniger als 15,0 kWh/100 km weist der Zertifizierungszyklus für das BEV den geringsten Energiebedarf auf einhundert Kilometer auf. Für die FCEV-Variante ist das energieeffizienteste Fahrprofil jenes des MSFs. Der dabei erzielte Verbrauchswert von ca. 22,5 kWh/100 km liegt etwas unterhalb jenem des WLTCs. Der Energiebedarf des Fahrverhaltens der Flotte des zweiten Segments liegt für beide Varianten über den Werten des MSFs und etwas unterhalb des Fahrprofils des KSFs und des LSFs. Bei dem BEV werden knapp 20,0 kWh/100 km und bei dem FCEV ca. 32,0 kWh/100 km für das Fahrverhalten der Flotte ermittelt. In dem Szenario des KSFs wird in dem Vergleich dazu eine höhere Energiemenge für die Überwindung der gleichen Distanz benötigt. Für das BEV steigt der Verbrauchswert auf etwa 22,5 kWh/100 km und für das FCEV auf etwa 34,0 kWh/100 km an. In dem Fahrprofil MSF werden niedrigere Energiemengen für das Fahren von einhundert Kilometer benötigt. Das Batteriefahrzeug der Mittelklasse benötigt ca. 15,5 kWh und das Brennstoffzellenfahrzeug ca. 22,5 kWh. Wird das Fahrprofil des LSFs betrachtet, steigen die Energiebedarfswerte in dem Vergleich zu den anderen Szenarien auf ein Maximum an. Der Maximalwert der Batterievariante liegt bei etwa 24,0 kWh/100 km und jener der Brennstoffzellenvariante bei etwa 39,0 kWh/100 km.

Die folgenden drei Tabellen geben eine Übersicht über die ermittelten Verbrauchswerte und deren Verhältnisse zu dem Status Quos des Betrachtungsjahrs 2015 wieder. In diesen sind die Resultate der Zertifizierungszyklen, jene des Fahrverhaltens der Flotte des zweiten Segments und jene der Nutzerverhalten KSF, MSF und LSF für das jeweilige Analysejahr enthalten. In der Tabelle 6-7 sind die BEV- und in der Tabelle 6-8 auf der Seite 201 sind die FCEV-Verbrauchswerte und deren Verhältnis gegenübergestellt. Die Tabelle 6-9 auf der Seite 201 weist das Verhältnis des Brennstoffzellenderivats gegenüber dem Batteriederivat des Betrachtungsjahrs 2015 und jenes des Prognosejahrs 2025 aus.

Bei einem **Vergleich der Batterievarianten** zeigt sich, dass sich der Zertifizierungsverbrauch des Prognosejahrs 2025 gegenüber jenem des Betrachtungsjahrs 2015 auf 102 % erhöht ist. Die festgestellte Erhöhung liegt an einem Wechsel des Zertifizierungszykluses, von dem NEFZ zu dem WLTC, und an den veränderten Fahrzeugeigenschaften, vgl. Kapitel 6.2.1. Durch diese Anpassungen wird die angenommene Verbesserung des Ladewirkungsgrads von 85 % auf 90 % überkompensiert. Für das BEV des zweiten Segments des Betrachtungsjahrs 2015 werden 13,8 kWh/100 km und für jenes des Prognosejahrs 2025 werden 14,1 kWh/100 km als Zertifizierungswert ermittelt. Sowohl bei den verschiedenen Nutzerprofilen als auch bei jenem, aus der MiD-Studie erarbeiteten, typischen, deutschen Fahrverhalten wird eine Reduzierung des Energiebedarfs für das Prognosejahr 2025 festgestellt. Die Verringerung des Verbrauchs liegt in dem Durchschnitt bei 11,5 %. Bei den betrachteten Szenarien bleibt das hinterlegte Streckenprofil in dem Gegensatz zu den Zertifizierungszyklen identisch. Die erzielbare Reduzierung des Verbrauchs resultiert aus den gestiegenen Wirkungsgraden der Komponenten, aus veränderten Fahrzeugeigenschaften und aus einem erhöhten Ladewirkungsgrad. Für das Fahrverhalten der Flotte des zweiten Segments werden in dem Prognosejahr 2025 19,9 kWh/100 km anstatt 22,5 kWh/100 km benötigt. Dies entspricht einer Reduzierung um 11,7 % auf 88,3 % des Energiebedarfs des Betrachtungsjahrs 2015. Bei dem Fahrprofil KSF reduziert sich der Verbrauch von 25,8 kWh/100 km in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 23,0 kWh/100 km in dem Prognosejahr 2025, bei dem Szenario MSF verringert sich jener von 17,6 kWh/100 km in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 15,4 kWh/100 km in dem Prognosejahr 2025 und bei dem Fahrprofil LFS nimmt der Energiebedarf von 26,6 kWh/100 km in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 23,7 kWh/100 km in dem Prognosejahr 2025 ab. Die Verbrauchswerte verringern sich somit auf 89,0 % für einen KSF, auf 87,6 % für einen MSF und auf 89,1 % für einen LSF. Aufgrund eines nahezu konstanten Zertifizierungsverbrauchs und einer Reduzierung des Energiebedarfs der verschiedenen Fahrprofile verringert sich die Differenz der Verbrauchswerte zwischen dem Zertifizierungszyklus und den anderen Fahrprofilen. Der Mehrbedarf der Fahrzeugflotte des zweiten Segments gegenüber dem Zertifizierungsverbrauch reduziert sich von 63 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 41 % in dem Prognosejahr 2025. Der KSF benötigt anstatt 87 % in dem Betrachtungsjahr 2015 nur noch 63 % in dem Prognosejahr 2025 mehr Energie. In dem Szenario des MSFs reduziert sich der Mehrbedarf von 27 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 9 % in dem Prognosejahr 2025 und bei dem Fahrprofil des LSFs verringert sich der Mehrbedarf von 93 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 68 % in dem Prognosejahr 2025. In dem Mittel wird der zusätzliche Energiebedarf um 22,3 % gesenkt.

Tabelle 6-7 Vergleich des Energiebedarfs für das Betrachtungsjahr 2015 und das Prognosejahr 2025 anhand des BEVs Seg-2

Fahrprofil Seg-2	2015: NEFZ 2025: WLTC	MiD-Seg-2-Flotte	Kurzstreckenfahrer	Mittelstreckenfahrer	Langstreckenfahrer	Einheit
BEV 2015	13,8	22,5	25,8	17,6	26,6	kWh/100km
BEV 2025	14,1	19,9	23,0	15,4	23,7	kWh/100km
BEV 2025/2015	102,0 %	88,3 %	89,0 %	87,6 %	89,1 %	-

Anhand der Tabelle 6-8 auf der Seite 201 wird die Entwicklung des Energiebedarfs für die **Fahrzeugvariante FCEV** für das zweite Segment für die verschiedenen Fahrprofilen und den jeweils gültigen

Zertifizierungszyklus bewertet. Wird zunächst letztgenanntes Fahrprofil verglichen, wird festgestellt, dass der Zertifizierungswert des Betrachtungsjahrs 2015 mit jenem des Prognosejahrs 2025 nahezu identisch ist. Obwohl sich sowohl die Fahrzeug- als auch die Komponenteneigenschaften verbessern, reduziert sich der Energiebedarf nicht signifikant. Dies resultiert, wie bereits für die BEV-Variante beschrieben, aus dem Wechsel des Zertifizierungszykluses von dem NEFZ zu dem WLTC. Bei den anderen vier Fahrprofilen, Fahrverhalten der Flotte des zweiten Segments, KSF, MSF und LSF, verringert sich der Energiebedarf in dem Durchschnitt auf 90,6 %, was einer Reduzierung um 9,4 % entspricht. Bei der Betrachtung des Fahrverhaltens der Flotte des zweiten Segments reduziert sich der Energiebedarf von 34,4 kWh/100 km in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 31,5 kWh/100 km in dem Prognosejahr 2025. Dies entspricht einer Reduzierung um 8,5 % auf 91,5 % des Verbrauchswerts des Betrachtungsjahrs 2015. Für das Fahrprofil des KSF wird ein Energiebedarf von 34,2 kWh/100 km in dem Prognosejahr 2025 anstatt 37,9 kWh/100 km in dem Betrachtungsjahr 2015, für einen MSF 22,6 kWh/100 km in dem Prognosejahr 2025 anstatt 25,8 kWh/100 km in dem Betrachtungsjahr 2015 und für einen LSF 38,9 kWh/100 km in dem Prognosejahr 2025 anstatt 41,6 kWh/100 km in dem Betrachtungsjahr 2015 erreicht. Die Verbrauchswerte reduzieren sich somit auf 90,2 %, auf 87,3 % und auf 93,7 % für einen KSF, einen MSF und einen LSF. Wird das Fahrverhalten der Flotte des zweiten Segments in Relation zu dem Zertifizierungsverbrauch analysiert, wird anstatt eines Mehrbedarfs von 52 % in dem Betrachtungsjahr 2015 ein zusätzlicher Verbrauch von 39 % in dem Prognosejahr 2025 festgestellt. Für das Fahrprofil des KSFs ändert sich der zusätzliche Bedarf von 67 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 51 % in dem Prognosejahr 2025, für einen MSF ändert sich dieser von 14 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 0 % in dem Prognosejahr 2025 und für einen LSF verringert sich jener von 83 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 72 % in dem Prognosejahr 2025. Durchschnittlich wird der relative Mehrbedarf der Fahrprofile um 13,5 % gegenüber jenem des Betrachtungsjahrs 2015 gesenkt.

Tabelle 6-8 Vergleich des Energiebedarfs für das Betrachtungsjahr 2015 und das Prognosejahr 2025 anhand des FCEVs Seg-2

Fahrprofil Seg-2	2015: NEFZ 2025: WLTC	MiD-Seg-2- Flotte	Kurzstrecken- fahrer	Mittelstrecken- fahrer	Langstrecken- fahrer	Einheit
FCEV 2015	22,7	34,4	37,9	25,8	41,6	kWh/100km
FCEV 2025	22,7	31,5	34,2	22,6	38,9	kWh/100km
FCEV 2025/2015	99,9 %	91,5 %	90,2 %	87,3 %	93,7 %	-

Da sich die festgestellten Energiebedarfe der Antriebsvarianten BEV und FCEV sowohl für die Zertifizierungszyklen als auch für die Szenarien der Fahrverhalten für das Prognosejahr 2025 unterschiedlich entwickeln, ist in der Tabelle 6-9 eine Übersicht über das Verhältnis des Energiebedarfs des FCEV zu jenem des BEVs sowohl für das Betrachtungsjahr 2015 als auch für das Prognosejahr 2025 dargestellt.

Tabelle 6-9 Vergleich des Energiebedarfs für das Betrachtungsjahr 2015 und das Prognosejahr 2025 anhand des Verhältnisses FCEV Seg-2 zu BEV Seg-2

Fahrprofil Seg-2	2015: NEFZ 2025: WLTC	MiD-Seg-2- Flotte	Kurzstrecken- fahrer	Mittelstrecken- fahrer	Langstrecken- fahrer	Einheit
FCEV 2015 / BEV 2015	163,9 %	152,8 %	146,6 %	146,9 %	156,0 %	-
FCEV 2025 / BEV 2025	160,5 %	158,3 %	148,4 %	146,3 %	164,0 %	-

Bei einem **Vergleich der Verbrauchswerte** in dem Zertifizierungszyklus zeigt sich, dass sich der relative Mehrbedarf des FCEVs in Bezug zu dem BEV von 63,9 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 60,5 % in dem Prognosejahr 2025 reduziert. Die geringe Verbesserung des relativen Mehrbedarfs resultiert sowohl aus einer unterschiedlichen Entwicklung der Fahrzeugmassen, BEV Segment 2 +125,8 kg und

FCEV Segment 2 -164,0 kg, und der verschiedenen Komponenteneffizienzen als auch aus einer angenommenen Verbesserung des Ladewirkungsgrads, 90 % in dem Prognosejahr 2025 und 85 % in dem Betrachtungsjahr 2015, vgl. dazu Kapitel 6.2.1. Zudem werden in diesem Vergleichsfall für die beiden Zertifizierungszyklen nur jene für den Fahrbetrieb notwendige Nebenverbraucher berücksichtigt. In den weiteren vier Fahrscenarien sind diese inkludiert und der Einfluss des geänderten Thermomanagements des BEVs in dem Prognosejahr 2025 berücksichtigt. Der relative Mehrbedarf erhöht sich bei dem Fahrverhalten der Flotte des zweiten Segments von 52,8 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 58,3 % in dem Prognosejahr 2025, bei dem KSF von 46,6 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 48,4 % in dem Prognosejahr 2025 und bei dem LSF von 56,0 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 64,0 % in dem Prognosejahr 2025. Bei dem Szenario des MSFs verringert sich das Verhältnis hingegen etwas. Dieses sinkt von 46,9 % in dem Betrachtungsjahr 2015 auf 46,3 % in dem Prognosejahr 2025. Für die Erhöhung in dem Fahrprofil des KSFs ist neben einer Verbesserung des Ladewirkungsgrads ein temporär niedriger Energiebedarf der Nebenverbraucher bei dem Aufwärmen der Fahrgastzelle zu nennen. Während in dem Betrachtungsjahr 2015 ein 6-kW-Wasserheizer eingesetzt wird, wird in dem Prognosejahr 2025 ein 2-kW-Luftheizer verwendet. Aus der Reduzierung der maximalen Leistung folgend ist die initial maximal aufzuwendende Leistung niedriger und ein geringer anfänglicher Energiebedarf ergibt sich, vgl. dazu Kapitel 6.2.2. Bei dem MSF ist der Einfluss eines niedrigeren initialen Energiebedarfs aufgrund einer erhöhten Fahrleistung geringer. In dem hinterlegten Außerortsprofil finden zudem vermehrt Beschleunigungsvorgänge statt. Diese führen dazu, dass sich eine erhöhte Masse verstärkt auf den Energiebedarf auswirkt. Das Verhältnis des Fahrzeuggewichts des FCEVs zu jenem des BEVs sinkt in dem Prognosejahr 2025 gegenüber jenem des Betrachtungsjahrs 2015 leicht. Der Energiebedarf des Batteriefahrzeugs reduziert sich folglich weniger und das Verhältnis der Verbrauchswerte BEV zu FCEV verringert sich. In dem Fahrprofil des LSFs dominiert, aufgrund der hohen Geschwindigkeiten, der Luftwiderstand. Der relative Einfluss einer erhöhten Masse sinkt somit gegenüber dem Fahrprofil Außerorts. Zusätzlich reduziert sich bei einer temporär länger anhaltenden, hohen Leistungsanfragen der Wirkungsgrad des Antriebssystems des FCEVs. Dies beruht auf der Tatsache, dass das eingebaute Batteriesystem eine temporär länger anhaltende, hohe Leistungsanfrage nicht komplett puffern kann und das Brennstoffzellensystem deshalb nicht in seinem Bestpunkt betrieben werden kann. Das Verhältnis der Verbrauchswerte FCEV/BEV steigt deshalb in dem Vergleich zu dem Außerortszyklus an. Bei einer Betrachtung des Fahrverhaltens der Flotte des zweiten Segments wird eine Verteilung über den Fahrtlängen, Fahrstreckentypen und Startzeiten berücksichtigt. Daraus resultierend werden die verschiedenen Effekte, beispielsweise eine anfänglich verringerte Heizleistung der Batterievariante, fahrleistungsspezifisch gewichtet. Daraus abgeleitet ergibt sich ein erhöhtes Verhältnis des Energiebedarfs des FCEVs zu jenem des BEVs für das Prognosejahr 2025 in dem Vergleich zu jenem des Betrachtungsjahrs 2015.

Aus den Verbrauchswerten des jeweiligen Fahrprofils resultierend, werden jene, in der Abbildung 6-21 auf der Seite 199 visualisierte, Reichweiten in dem Prognosejahr 2025 zurückgelegt. Bei einer **Betrachtung der möglichen Fahrstrecken** des FCEVs zu jenen des BEVs zeigt sich deutlich, dass die erstgenannte Fahrzeugvariante höhere Distanzen erzielt. Je nach Fahrscenario besitzt das Brennstoffzellenfahrzeug bis zu 47 % bzw. bis zu 202 km mehr Reichweite. Bei der Analyse des Zertifizierungszyklus ist die maximal mögliche Wegstrecke des FCEVs um etwa 159 km länger als jene des BEVs. Dies entspricht einer relativen Erhöhung einer maximalen Reichweite des BEVs um etwa 34 %. In dem Fahrprofil des KSFs fällt die Steigerung der möglichen Fahrstrecke etwas geringer aus. In diesem Szenario werden mit dem Derivat mit Brennstoffzellensystem 129 km respektive 45 % mehr gefahren. In dem Fahrprofil des MSFs erhöhen sich beide Angaben. Das FCEV besitzt 202 km bzw. 47 % mehr Reichweite gegenüber dem BEV. In dem Gegensatz zu den Maximalwerten in dem Fahrprofil MSF werden in dem Fahrprofil LSF die Minimalwerte erzielt. Die maximale Fahrstrecke des FCEVs ist lediglich 87 km bzw. 31 % länger. Bei einer Berücksichtigung des typischen Fahrverhaltens der Flotte des zweiten Segments werden hingegen etwa 36 % bzw. 119 km an zusätzlich verfügbarer Fahrstrecke für das Brennstoffzellenautomobil errechnet. Bei dieser Betrachtung ist anzumerken, dass es sich bei den Angaben um Energieverbräuche in dem Jahresmittel handelt. Somit tritt in kalten Winter- oder in warmen Som-

merbedingungen, wie die Analyse der verschiedenen Wetterbedingungen für das Betrachtungsjahr 2015 in dem Abschnitt 6.1.2.4 zeigt, eine deutlich signifikantere Reduzierung der maximalen Fahrstrecke auf. Diese Limitierung der Reichweite schränkt die Nutzbarkeit der Antriebsvarianten unterschiedlich stark ein und sollte zusammen mit einer Kostenanalyse in zukünftigen Studien detailliert untersucht werden.

7 Schlussbetrachtung der Arbeit - Zusammenfassung und Ausblick

In der Schlussbetrachtung werden eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick inkl. Handlungsempfehlungen gegeben. Zunächst wird folgend auf den Aufbau der Arbeit eingegangen. Speziell werden dabei jene aus dem identifizierten Forschungsbedarf abgeleiteten Forschungsfragen aufgegriffen und die, für deren Beantwortung neu entwickelte, einheitlich anwendbare, gesamtheitliche Bewertungsmethode als auch deren Umsetzung, beschrieben. Anschließend folgt eine kritische Diskussion der daraus resultierenden Ergebnisse. Final abgerundet wird die vorliegende Arbeit mit einer Ableitung von Handlungsempfehlungen, welche auf den neu gewonnenen Erkenntnissen basieren.

7.1 Zusammenfassung der Arbeit und Diskussion der Ergebnisse

Aus den globalen Zielen und Trends einer Ressourcenschonung, des Klimawandels und einer benötigten Steigerung der Antriebseffizienz resultiert aus dem aktuellen Kenntnisstand der Forschung eine Problemstellung einer fehlenden, einheitlichen und gesamtheitlichen Bewertung verschiedener Antriebsvarianten. In der Einleitung dieser Arbeit wird der Bedarf nach einer „**Entwicklung einer Methodik für eine einheitliche Bewertung des gesamtheitlichen Energiebedarfs unter realen Rahmenbedingungen und dessen Anwendung auf verschiedene Pkw Antriebsvarianten**“ und der Stand der Technik detailliert erläutert. Mit dem Ziel jene, aus der eigenständig identifizierten Forschungslücke, abgeleiteten Forschungsfragen

- ***Welchen Einfluss haben variierende Fahrbedingungen in Form verschiedener Fahrzyklen auf den Energiebedarf unterschiedlicher Antriebsvarianten?***
- ***Wie verändert sich der Energiebedarf verschiedener Antriebsstrangkonfigurationen unter der Berücksichtigung des zusätzlichen Energieaufwands, verursacht durch eine real auftretende Nebenverbraucherleistung für unterschiedliche Jahreszeiten und für unterschiedliche europäische Klimabedingungen?***
- ***Welchen Einfluss haben extreme Wetterbedingungen auf den Energiebedarf der Fahrzeugtopologien Batterie-, Brennstoffzellen- und Benzinfahrzeug?***
- ***Wie wirken sich unterschiedliche Nutzerprofile und das Fahrverhalten der deutschen Privat-Pkw-Fahrzeugflotte auf den Energiebedarf aus?***
- ***Wie könnte sich der Energiebedarf für die beiden Antriebsvarianten Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug bis zu dem Jahr 2025 entwickeln?***

fundiert zu beantworten, werden auf das **1. Kapitel** „Einleitung, Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit“ folgend die notwendigen Grundlagen in dem PKW-Umfeld erörtert.

In dem **2. Kapitel** werden erforderliche Grundkenntnisse der Arbeit erläutert und bei Bedarf auf Fachliteratur verwiesen. Neben einer Tank-to-Wheel-Analyse in dem Kontext einer Well-to-Wheel-Analyse werden jene in dieser Arbeit verwendeten Fahrzyklen und die dafür benötigten Fahrwiderstände beschrieben. Des Weiteren werden die untersuchten Antriebsstrangvarianten und deren Kernkomponenten, wie beispielsweise ein Elektro- oder ein Verbrennungsmotor, aber auch ein Brennstoffzellen- oder Batteriesystem, detailliert erklärt. Abschließend werden thermodynamische Grundlagen und Thermomanagement-Anwendungen in einem Pkw beschrieben, um den Einfluss der Nebenverbraucher realitätsnah bewerten zu können.

Nach der Dokumentation der theoretischen Kenntnisse wird eine, in dieser Dissertation neu entwickelte, Methodik für eine einheitlichen, gesamtheitlichen Bewertung verschiedener Antriebsvarianten in dem

3. Kapitel vorgestellt. In die erarbeitete, gesamtheitliche Methodik fließt eine Analyse des europäischen Fahrzeugmarkts und des europäischen Klimas – repräsentativ abgebildet durch die Witterungsbedingungen in Norwegen, in Deutschland und in Spanien, stellvertretend für ein kaltes, mildes und warmes europäisches Klima, ein. Die Klimarandbedingungen werden dabei mit einer neuartigen Methodik klassifiziert, um trotz einer notwendigen Reduzierung der Wetterprofile den jährlichen Witterungseinfluss originalgetreu widerzuspiegeln. Des Weiteren erfolgt eine technologiebasierte Segmentierung in die Fahrzeugklassen klein, mittel und groß, um die Simulationsdauer zu reduzieren, aber dennoch die Gegebenheiten des europäischen Fahrzeugmarkts zu repräsentieren. Auf Basis der Eigenschaften der konventionellen Antriebe und einer weitreichenden Marktanalyse der alternativen Antriebe erfolgt eine Setzung von dynamischen und statischen Anforderungen. Mit einem erarbeiteten, iterativ arbeitenden Auslegungstool, welches unter anderem spezifische Komponenteneigenschaften, Reichweiten, Beschleunigungen, Höchstgeschwindigkeiten, Lastpunkte und Zyklen-Anforderungen berücksichtigt, werden die Parameter der Antriebsvarianten bestimmt. Die dabei verwendeten leistungs- bzw. energiespezifischen Eigenschaften der Komponenten als auch der Systemaufbau der einzelnen Energiewandler und -speicher werden in dieser Arbeit hergeleitet. Zudem werden Nutzerprofile und das Fahrverhalten der deutschen Bevölkerung, stellvertretend für Europa, analysiert. Mit der untersuchten Ausprägung des Mobilitätsverhaltens wird zu dem einen eine Verteilung der Fahrleistung über der Wegstrecke und den drei Fahrprofilen Innerorts, Außerorts und Autobahn und zu dem anderen eine Definition von fünf Startzeiten (Morgen, Vormittag, Mittag, Nachmittag und Abend) eruiert. Mit den so gewonnenen Mobilitätsdaten kann das Fahrverhalten der deutschen Privat-Pkw-Flotte repräsentiert, individuelle Nutzer/Flotten über eine Zusammenstellung eines Fahrprofils bzw. mehrerer Fahrprofile analysiert und die Startzeiten der Fahrten festgelegt werden. Über Letztgenanntes und eine neu entwickelte Methode für die Klassifizierung der Umwelteigenschaften werden die Start- und die Fahrbedingungen definiert. Dabei wird zwischen den drei Ausgangszuständen „Aufgeheizt“ – in der Sonne geparkt, „Schatten“ – in dem Schatten geparkt und „Vorkonditioniert“ – Betriebs- bzw. Komforttemperatur bei einem Start einer Fahrt vorherrschend, unterschieden. Des Weiteren wird ein modularer Simulationsaufbau etabliert, um den Modellaufbau möglichst effizient zu gestalten. Das Gesamtfahrzeug wird hierfür in die Untergruppen „Fahrzeugarchitektur“, „Antriebsstrang mechanisch und elektrisch“, „Antriebsstrang thermisch“ und „Fahrgastzelle thermisch“ unterteilt und Synergieeffekte werden ausgenutzt.

In dem darauffolgenden **4. Kapitel** wird eine Validierung und Beschreibung auf Komponenten-, auf Modul- und auf Gesamtfahrzeugebene durchgeführt. Dabei werden zunächst die wichtigsten Komponenten anhand von Messdaten oder von validierten Modellen einzeln evaluiert, um die Genauigkeit der Abbildung des Verhaltens der Komponenten zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang werden das Batteriesystem, das Brennstoffzellensystem, die elektrische Antriebseinheit und der Verbrennungsmotor detailliert betrachtet. Bei dem Vergleich der Ergebnisse der Simulationsmodelle zu den jeweiligen Referenzwerten wird auf Komponentenebene durchgehend eine hohe Übereinstimmung aufgezeigt. Auf Modulebene wird ein rollgeschwindigkeits- und temperaturabhängiges Reifenmodell, die Klimatisierung der Fahrgastzelle und der Zertifizierungsverbrauch verschiedener Antriebsvarianten validiert. Bei dem Erstgenannten wird sowohl der Einfluss von niedrigen Temperaturen als auch jener von erhöhten Geschwindigkeiten berücksichtigt. Das verwendete Reifenmodell bildet somit das reale Verhalten des Rollwiderstands ab. Für eine realitätsnahe Modellierung des Energiebedarfs der Klimatisierung der Fahrgastzelle wird das Aufwärm- und das Abkühlverhalten der Kabine, der Energiebedarf für das Heizen mit einem elektrischen Heizer in einem Wasserkreislauf, die Leistungszahl COP für das Kühlen und der zusätzliche Energiebedarf der Klimatisierung über die Zyklen Innerorts, Außerorts und Autobahn für die Temperaturen -20 °C bis $+30\text{ °C}$ in 10-Kelvin-Schritten durchgeführt. Bei der Validierung wird gezeigt, dass sowohl das transiente Verhalten bei dem Aufwärmen bzw. bei dem Abkühlen als auch der Energiebedarf der Klimatisierung der Fahrgastzellen detailliert abgebildet wird. Des Weiteren wird auf Modulebene ein Vergleich des Energiebedarfs in dem Zertifizierungszyklus NEFZ ohne den Einfluss zusätzlicher Nebenverbraucher für alle Antriebsvarianten gezogen, um die erste und zweite Untergruppe – die Fahrzeugarchitektur und den mechanischen und elektrischen Antriebsstrangaufbau – zu validieren. Hierbei wird dokumentiert, dass der Verbrauch ohne den Einfluss der Nebenverbraucher detailgetreu abgebildet wird. Abschließend wird auf der Gesamtfahrzeugebene für ein batterieelektrisches und

ein konventionelles Fahrzeug eine Gesamtfahrzeugsimulation umgesetzt, um das Zusammenspiel der einzelnen Untergruppen zu validieren. Dabei wird der simulierte Energiebedarf inkl. der Nebenverbraucherleistung für Temperaturen von -20 °C bis $+30\text{ °C}$ in 10-K-Schritten mit Messdaten verglichen. Die dabei durchgeführte Gegenüberstellung zeigt, dass der Energiebedarf auch gesamtheitlich gut abgebildet wird und somit die angewandte Gesamtfahrzeugsimulation valide ist. Durch die in dem 4. Kapitel umgesetzten Validierungen wird folglich bestätigt, dass das Verhalten der Komponenten, jenes der Module und jenes des Gesamtfahrzeugs realitätsnah modelliert wird.

In dem folgenden **5. Kapitel** wird aus einzelnen Komponenten ein modularer Aufbau der Antriebsvarianten abgeleitet und ausführlich beschrieben. Für die Fahrzeugvarianten Batteriefahrzeug, Range-Extender mit einem Brennstoffzellensystem, Brennstoffzellenfahrzeug mit einem Plug-in-Batteriesystem, Brennstoffzellenfahrzeug und die beiden konventionellen Antriebsformen mit einem Diesel- oder mit einem Ottomotor werden jeweils die vier Submodule „Fahrzeugarchitektur“, „Antriebsstrang mechanisch und elektrisch“, „Antriebsstrang thermisch“ und „Fahrgastzelle thermisch“ in dem Detail erläutert und die dazugehörigen Simulationsmodelle erörtert. Des Weiteren werden für alle Antriebsstrangvarianten die angewandten Betriebsstrategien, Thermomanagementlösungen, Regelungsstrategien und Subfunktionen eingehend dokumentiert.

Mit den Kenntnissen über die beschriebenen theoretischen Grundlagen, der neu entwickelten Methodik, der durchgeführten Komponenten-, Modul- und Gesamtfahrzeugvalidierung und dem gezeigten, neu aufgebauten, modularen Aufbau der Gesamtfahrzeugmodelle werden die eingangs identifizierten Forschungsfragen in dem **6. Kapitel** beantwortet. In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Ergebnisse des Betrachtungsjahrs 2015 und anschließend auf jene des Prognosejahrs 2025 eingegangen.

Als Erstes wird der Einfluss variierender Fahrbedingungen auf den Energiebedarf mit ausschließlich essenziellen Nebenverbrauchern unterschiedlicher Antriebsvarianten in Form einer Analyse verschiedener Fahrzyklen untersucht, diskutiert und gegenübergestellt. Bei dem durchgeführten Vergleich zeigt sich, dass die alternativen Antriebsvarianten generell Verbrauchsvorteile gegenüber den konventionellen Antrieben besitzen. In dem Vergleich der Antriebsvarianten ist zu erkennen, dass das Batteriefahrzeug den geringsten Energiebedarf aufweist. Aus der Gegenüberstellung der Zyklen resultiert, dass der Außerortszyklus gefolgt von dem Zertifizierungszyklus am effizientesten gefahren wird. Je nach Antriebsvariante folgt anschließend das Fahrprofil Innerorts oder das Fahrprofil Autobahn. Des Weiteren werden die simulierten NEFZ-Verbräuche der verschiedenen Segmente in diesem Abschnitt mit Angaben existierender Fahrzeuge verglichen, um den Energiebedarf ohne zusätzliche Nebenverbraucher zu verifizieren. Hierbei zeigt sich, dass die simulierten Werte den realen Angaben entsprechen und dass die ermittelten Verbrauchswerte valide sind.

Nachdem der Einfluss verschiedener Fahrbedingungen in Form verschiedener Fahrzyklen auf unterschiedliche Antriebsvarianten evaluiert wurde, wird der Energiebedarf unter der Berücksichtigung des zusätzlichen Energieaufwands, verursacht durch eine real auftretende Nebenverbraucherleistung für unterschiedliche Jahreszeiten und europäische Klimabedingungen, untersucht. Dabei werden die Klimarandbedingungen der drei Länder Spanien, Deutschland und Norwegen stellvertretend für ein warmes, mildes und kaltes europäisches Klima herangezogen. Für alle Umgebungsbedingungen wird der Energiebedarf für die meteorologischen Jahreszeiten Winter, Frühling, Sommer und Herbst für die drei Fahrprofile Innerorts, Außerorts und Autobahn betrachtet und mit dem Energiebedarf ohne Nebenverbraucherleistung verglichen. Generell wird bei dem realisierten Vergleich gezeigt, dass der Einfluss auf den Energiebedarf pro einhundert Kilometer für jene Zyklen mit einer niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeit stärker ausfällt. Dies beruht auf einer Verteilung der zusätzlichen Nebenverbraucherleistung auf eine kürzere Fahrtstrecke und, für alternative Antriebe geltend, auf einer erhöhten Antriebsstrangeffizienz und einer, in einem reinen Batteriebetrieb, fehlenden, nutzbaren Abwärme. Bei der Betrachtung der meteorologischen Jahreszeiten wird für Deutschland und für Norwegen herausgearbeitet, dass der Energiebedarf pro einhundert Kilometer in dem Durchschnitt in dem Winter den höchsten und

in dem Sommer den niedrigsten Verbrauchswert aufweist. Je nach Fahrzyklus, Jahreszeit, Antriebsstrangvariante und betrachtetes Land ist der zusätzliche Energiebedarf stark unterschiedlich. Beispielsweise ist der Mehrbedarf für die Klimaregion Deutschland in dem Innerortszyklus in dem Winter für ein Batteriefahrzeug nach ca. drei Kilometer ca. 140 %, während jener bei einer Autobahnfahrt in dem Sommer für ein Fahrzeug mit einem Ottomotor nach ca. 50 Kilometer lediglich etwa 3 % beträgt. Bei der Betrachtung spanischer Wetterbedingungen liegt der Verbrauch in dem Sommer aufgrund von hohen Sommer- und aufgrund von milden Wintertemperaturen häufig über jenem des Winters. Gemittelt über die Jahreszeiten ist der spanische deshalb unterhalb des deutschen und dieser wiederum unterhalb des norwegischen Energiebedarfs. Der Einfluss des zusätzlichen Energiebedarfs, basierend auf einer realitätsnahen Abbildung der Rahmenbedingungen, wird in diesem Abschnitt der Arbeit detailliert beleuchtet und die zweite Forschungsfrage beantwortet.

Da bei der Betrachtung der Jahreszeiten eine Gewichtung der Startzeiten und der Temperaturprofile erfolgt, werden, um die Fragestellung nach dem selektiven Einfluss extremer Wetterbedingungen zu beantworten, diese dezidiert analysiert. Dazu werden die kältesten und die wärmsten 20 % und 1 % der Winter- und der Sommerbedingungen evaluiert. Durch diese Vorgehensweise wird die Sensitivität des Einflusses der Nebenverbraucher antriebsstrangspezifisch aufgezeigt. Besonders bei der batterieelektrischen Variante in den extremen Winterszenarien wird ein deutlicher Einfluss aufgrund einer fehlenden Abwärmenutzung festgestellt. Maximal wird hierbei ein Mehrbedarf von 271 % benötigt. Bei dem Brennstoffzellenfahrzeug und bei dem Fahrzeug mit einem Ottomotor fällt der Einfluss aufgrund der Abwärmenutzung und des erhöhten Basisenergiebedarfs, relativ betrachtet, geringer aus. Der zusätzliche Energiebedarf beläuft sich für das Brennstoffzellenfahrzeug auf 157 % und für das Fahrzeug mit einem Ottomotor auf 50 %.

Bei der Analyse der Jahreszeiten und bei jener der Extremwerte, zeigt sich deutlich, dass der Einfluss der Nebenverbraucher stark situativ ist. Unter anderem haben sowohl die bisher zurückgelegte Fahrleistung als auch die unterschiedlichen Startbedingungen eine merkliche Auswirkung auf den Energiebedarf. Die Berücksichtigung realitätsnaher Gegebenheit ist somit nutzer- bzw. flottenspezifisch. Für eine detaillierte Analyse des Einflusses wird der zusätzliche Leistungsbedarf beispielhaft anhand von drei Nutzerprofilen, welche einen Kurz-, einen Mittel- und einen Langstreckenfahrer repräsentieren, und anhand des Verbrauchs einer Fahrzeugflotte, welche das deutsche Fahrverhalten privater Pkw-Halter widerspiegelt, analysiert. Bei der umgesetzten Betrachtung wird gezeigt, dass ein Mittelstreckenfahrer, aufgrund einer bereits eingeschwungenen Nebenverbraucherleistung und den Fahrbedingungen in dem Außerortsfahrprofil, in dem Vergleich der Nutzerprofile am effizientesten eine Fahrstrecke von einhundert Kilometer zurücklegt. Bei der Untersuchung des Einflusses der Nebenverbraucher auf einen Flottenverbrauch wird die Gewichtung des analysierten Mobilitätsverhaltens der Startzeiten, der Fahrstrecken und des Fahrprofils der einzelnen Segmentgrößen mit der in dieser Arbeit geschaffenen Datenbank der simulierten Durchschnittsverbräuche der einzelnen Antriebsvarianten multipliziert und ein realitätsnaher Flottenverbrauch berechnet. Die ermittelten Flottenverbräuche werden mittels realen Verbrauchsangaben verifiziert, um die Genauigkeit der angewandten Methodik sicherzustellen. Bei einem Vergleich zu diesen zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit einer Abweichung kleiner als 6 %. Der festgestellte Flottenverbrauch wird zudem in das Verhältnis zu dem Zertifizierungsbedarf gestellt, um den Einfluss der zusätzlichen Leistung zu bewerten. Dabei wird gezeigt, dass der Mehrbedarf für eine Flotte bestehend aus konventionellen Antrieben bei ca. 40 %, bestehend aus Brennstofffahrzeugen bei ca. 50 % und für FC-PHEVs, für FC-REEVs und für BEVs mit steigendem, batterieelektrischem Anteil bei bis zu ca. 60 % für das Betrachtungsjahr 2015 liegt.

Nachdem der Einfluss der Nebenverbraucher für die verschiedenen Antriebskonfigurationen, BEV, FC-REEV, FC-PHEV, FCEV, ICE-G- und ICE-D-Fahrzeug für das Betrachtungsjahr 2015 detailliert analysiert wurden, wird abschließend eine mögliche Entwicklung des Energiebedarfs für die beiden Antriebsvarianten BEV und FCEV für das Prognosejahr 2025 evaluiert. Dabei wird der Einfluss verschiedener Fahrzyklen auf alle drei Fahrzeugsegmente betrachtet. Zudem wird der saisonale Energiebedarf

anhand des zweiten Segments bewertet. Des Weiteren werden der Flottenbedarf für ein typisch deutsches Fahrverhalten und die Verbrauchswerte für einen Kurz-, einen Mittel- und einen Langstreckenfahrer für die Mittelklassevariante des BEVs und des FCEVs eruiert. Bei der Energiebedarfsanalyse der verschiedenen Zyklen wird herausgearbeitet, dass trotz einer angenommenen Steigerung der Reichweiten eine Reduzierung des Verbrauchs in den meisten Fahrzyklen erzielt wird. Lediglich für den, in dem Prognosejahr 2025 angenommen, Zertifizierungszyklus, dem WLTC, wird für die kleine und für die mittlere Fahrzeugklasse eine Steigerung des Verbrauchs ermittelt. Dies resultiert aus dem Wechsel des zu der Zertifizierung herangezogenen Geschwindigkeitsprofils, NEFZ zu WLTC. In den verschiedenen Artemiszyklen wird der Verbrauch auf 95 % bis auf 77 % bezogen auf das Betrachtungsjahr 2015 reduziert. Diese Reduzierung des Energiebedarfs liegt sowohl an verbesserten Komponenten- und an verbesserten Fahrzeugeigenschaften als auch, für das BEV geltend, an dem Einfluss des gestiegenen Ladewirkungsgrads.

Bei der Betrachtung des durchschnittlichen Energiebedarfs über den Jahreszeiten und der Wegstrecke wird ebenfalls ein niedrigerer Wert für das Prognosejahr 2025 ermittelt. Bei einem Vergleich des Flottenverbrauchs des typisch deutschen Fahrverhaltens der Variante der Mittelklasse wird der Energiebedarf für ein Batteriefahrzeug auf 88,3 % und für ein Brennstoffzellenfahrzeug auf 91,5 % in dem Vergleich zu dem Verbrauch des Betrachtungsjahrs 2015 reduziert. Für die Fahrprofilsszenarien Kurz-, Mittel- und Langstreckenfahrer wird eine Verringerung auf 89,0 %, auf 87,6 % und auf 89,1 % für eine Batteriefahrzeugvariante und auf 90,2 %, auf 87,3 % und auf 93,7 % für ein Brennstoffzellenderivat festgestellt. Durch einen nahezu konstanten Energiebedarf in dem Zertifizierungszyklus, bedingt durch den Wechsel des Zyklus, und einem reduzierten Verbrauch unter realitätsnahen Bedingungen, verringert sich jener durch das Fahrprofil und durch die Nebenverbraucher verursachte Mehrbedarf. Für das typisch deutsche Fahrverhalten des zweiten Segments reduziert sich der Mehrbedarf beispielsweise von 63 % auf 41 % bei einem BEV und von 52 % auf 39 % bei einem FCEV. Bezogen auf den absoluten Energiebedarf und die Reichweite bedeutet dies, dass unter realitätsnahen Bedingungen und unter der Berücksichtigung des typischen deutschen Fahrverhaltens ein Batteriefahrzeug der Mittelklasse durchschnittlich 19,9 kWh/100 km benötigt und 336 km, ohne eine erneute Aufladung, absolvieren und ein Brennstoffzellenderivat gemittelt 31,5 kWh/100 km umsetzt und 455 km mit einer Wasserstofftankfüllung zurücklegen kann. Mit den verwendeten Annahmen der Entwicklung der Fahrzeuge besitzt das Batteriefahrzeug analog zu dem Betrachtungsjahr 2015 auch in dem Prognosejahr 2025 einen Effizienzvorteil, während das Brennstoffzellenfahrzeug analog zu dem Betrachtungsjahr 2015 auch in dem Prognosejahr 2025 einen Vorteil bei der Reichweite aufweist.

7.2 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Für eine umfangreiche Beantwortung der Forschungsfragen ist in der vorliegenden Arbeit eine Methodik entwickelt worden, mit welcher der gesamtheitliche Energiebedarf verschiedener Antriebsvarianten unter realitätsnahen Bedingungen einheitlich ermittelt werden kann. Zudem wurde die neu erstellte Methodik auf alternative und konventionelle Antriebe angewandt und der Energiebedarf unter der Berücksichtigung der Nebenverbraucher kritisch analysiert. Mit der geschaffenen Methodik für eine einheitlichen Bewertung verschiedener Antriebsvarianten konnte somit der gesamtheitliche Energiebedarf anhand europäischer Referenzfahrzeugsegmente und Klimaeinflüsse detailliert eruiert und umfangreich bewertet werden.

Neben den bereits analysierten Antriebsvarianten sollten auf diese Arbeit folgend **weitere Antriebsvarianten** untersucht werden. Beispielsweise sollten Plug-In-Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor hinsichtlich des gesamtheitlichen Energiebedarfs beleuchtet werden. Besonders interessant wäre hierbei eine Betrachtung des anfänglichen Ladezustands bei Fahrtantritt. In der durchgeführten Analyse wurde für den Ladezustand vereinfacht angenommen, dass das Batteriesystem bei dem Start der Fahrt nahezu vollständig geladen ist. Ist dies nicht zutreffend, würde der zweite Energiewandler früher aktiviert werden und den Energieverbrauch beeinflussen.

Des Weiteren ist eine Analyse **weiterer Zielmärkte** der Automobilindustrie mit anderen Wetterbedingungen und anderen Fahrverhalten interessant. Aufgrund von hohen Absatzzahlen sind die Verkaufsregionen USA, Japan und China von hoher Bedeutung. Methodisch könnte jenes in dem Zielmarkt vorherrschende Klima und dessen Auswirkungen auf den gesamtheitlichen Energiebedarf analog dem erarbeiteten Vorgehen ermittelt und zusammen mit dem länderspezifischen Fahrverhalten bewertet werden.

Zusätzlich sollte mit der erarbeiteten Methodik der Einfluss **verschiedener Betriebsstrategien und unterschiedlicher Lösungen des Thermomanagements** auf den gesamtheitlichen Energiebedarf untersucht werden. In dem Kontext Ersterem könnte beispielsweise der resultierende Mehrbedarf bei einer Schonung der Batterie bei kalten Starttemperaturen und einer resultierenden Leistungsbereitstellung mittels des Brennstoffzellensystems bei einem FC-PHEV der Ersparnis der Lebensdauer des Batteriesystems gegenübergestellt werden. In dem Kontext Zweiterem könnten verschiedene Arten der Wärmebereitstellung mittels der erarbeiteten Methodik untersucht und hinsichtlich des Einflusses auf den gesamtheitlichen Energiebedarf bewertet werden. Beispielsweise könnte für das deutsche Privat-Pkw-Fahrverhalten oder für unterschiedliche Nutzertypen, wie beispielsweise einen Kurzstreckenfahrer, die reale Energieersparnis verschiedener Lösungen des Thermomanagements bewertet und diese deren Kosten gegenübergestellt werden. Anwendbar wäre dies beispielsweise für verschiedene Wärmespeicher und dessen Anschaffungskosten.

Neben den Betriebsstrategien und den Lösungen des Thermomanagements sollte die **Analyse des Fahrverhaltens** und jene der Auswirkung der Nebenverbraucher auf den realen Energiebedarf für OEMs für eine **Auslegung verschiedener Antriebsvarianten** dienen. Nutzerspezifische Lösungen, beispielsweise für Kurzstreckenfahrer, oder Auslegungen der Energiespeicher auf real vorkommende Szenarien, wie beispielsweise lange Fahrten in den Winterurlaub mit einem hohen gesamtheitlichen Energiebedarf, könnten abgeleitet und entwickelt werden.

Ferner sollte der ermittelte, gesamtheitliche Energiebedarf für eine **Well-to-Wheel-Betrachtung** verwendet werden. Damit könnte eine realitätsnahe Analyse der eingesetzten Primärenergie erfolgen und der Einfluss der Nebenverbraucher antriebsstrangspezifisch berücksichtigt und beurteilt werden.

Des Weiteren sollten **nutzerspezifische Analysen**, basierend auf den neu gewonnenen Erkenntnissen über einen realitätsnahen Energiebedarf gesamtheitlich, durchgeführt werden. Dabei könnten unter anderem **Kostenanalysen** mit den individuellen Verbrauchswerten erstellt und so kundenspezifisch der Kennwert Total-Cost-of-Ownership berechnet werden. Zusammen mit den individuellen Kosten sollte zudem der **Kundennutzen** der verschiedenen Antriebsvarianten mittels realitätsnahen saisonalen, jährlichen und extremen Reichweiten neu bewertet werden.

Final sollte eine **vollumfängliche Bewertung** verschiedener Antriebsvarianten mit deren Entwicklungspotenzialen unter den Prämissen des realitätsnahen Energiebedarfs, der Kosten, des Kundennutzens und der Emissionen realisiert werden. Die neu entwickelte Methodik, die von Grund auf erstellten, validierten, gesamtheitlichen Simulationsmodelle und die erstmals ermittelten, realitätsnahen Energieverbräuche liefern eine hervorragende Ausgangslage, um einen Vergleich diverser Antriebsformen und verschiedener Fahrzeuggrößen einheitlich, umfassend und fair umzusetzen.

Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Kommission, „Statistical Pocketbook 2019: EU transport in figures“, 2019.
 - [2] Rat der Europäischen Gemeinschaften, *Richtlinie 70/220/EWG*. 1970, S. 22.
 - [3] Umwelt Bundesamt, „Europäische Abgas-Gesetzgebung“, 2019. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/pkw-leichte-nutzfahrzeuge> (zugegriffen am 19. Jan. 2019).
 - [4] H.-H. Braess, *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
 - [5] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und nukleare Sicherheit, „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung“, 2009.
 - [6] A. Huss, H. Maas und H. Hass, „TANK-TO-WHEELS Report Version 4.0 JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS“, 2013.
 - [7] S. E. Plotkin, M. K. Singh und ORNL, „Multi-path transportation futures study: vehicle characterization and scenario analyses.“, 2009.
 - [8] A. Moawad und A. Rousseau, „Light-Duty Vehicle Fuel Consumption Displacement Potential up to 2045“, 2014.
 - [9] B. Flieger, „Innenraummodellierung einer Fahrzeugkabine in der Programmiersprache Modelica“, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2013.
 - [10] P. Unterguggenberger, „Bewertung von Wärmemanagementmaßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Motorwarmlauf“, Dissertation, Technische Universität Graz, 2012.
 - [11] H. Hopp, „Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug-Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2016.
 - [12] T. Tang, „Analyse der Energieeffizienz eines Brennstoffzellenstapels im Kaltstartbetrieb“, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2016.
 - [13] C. Haupt, „Ein multiphysikalisches Simulationsmodell zur Bewertung von Antriebs- und Wärmemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug“, Dissertation, Technische Universität München, 2013.
 - [14] H.-P. Lenz und W. Tober, *Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte*. Springer Vieweg, 2016.
 - [15] H. Lohse-Busch *et al.*, „Ambient Temperature (20°F, 72°F and 95°F) Impact on Fuel and Energy Consumption for Several Conventional Vehicles, Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicle“, *SAE Int.*, S. 33, Apr. 2013.
 - [16] Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen und Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020“, Aachen, 2012.
 - [17] Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen und Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „CO₂-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020“, Aachen, 2014.
 - [18] P. Mock, „Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2010.
 - [19] D. Kreyenberg, „Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2016.
 - [20] B. Hollweck, „Well-to-Wheel Analysis of Electrified Drivetrains under Realistic Boundary Conditions and User Behaviour“. European GT Conference, Frankfurt, 2016.
 - [21] R. Edwards *et al.*, „Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context WELL-TO-TANK (WTT) Report. Version 4.“, 2013.
 - [22] JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, „JRC Technical Reports: Well-To-Wheels Report Version 4.a. JEC Well-to-wheels Analysis“, 2014.
 - [23] Rat der Europäischen Gemeinschaften, *Richtlinie 91/441/EWG*. 1991, S. 106.
 - [24] T. Schütz, *Hucho - Aerodynamik des Automobils*. München: Springer Vieweg, 2013.
 - [25] Vereinte Nationen, *Addendum 100: Regulation No. 101*. 2013, S. 100.
 - [26] Wirtschafts- und Sozialrat der Vereinten Nationen, *Proposal for Amendment 5 to global technical regulation No. 15 (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP))*. 2018, S. 377.
 - [27] Verband der Automobilindustrie E.V. (VDA), „WLTP – Neues Testverfahren weltweit am Start“, Berlin, 2018.
 - [28] M. André, „The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions“, *Sci. Total Environ.*, Bd. 334–335, S. 73–84, 2004.
 - [29] TRL Limited, „ARTEMIS: Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems – Final Report“, 2007.
 - [30] T. J. Barlow, S. Latham, I. S. McCrae und P. G. Boulter, „A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions“, 2009.
-

-
- [31] Wirtschaftskommission für Europa, „World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29)“, 2019. <https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=2523340> (zugegriffen am 09. Apr. 2019).
- [32] Daimler AG, „Technische Abbildungen Fahrzeugmodelle“. Daimler AG, 2018.
- [33] M. Mitschke und H. Wallentowitz, *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [34] J. Reimpell und K. Hoseus, *Fahrwerktechnik: Fahrzeugmechanik*. Würzburg: Vogel-Fachbuch, 1992.
- [35] N.N., „Ratgeber Reifen – Spritsparen mit moderner Reifentechnik“. Beilage zur Auto Bild von Michelin in der Ausgabe Reifen-Spezial 2008, 2008.
- [36] N.N., „Der Reifen – Rollwiderstand und Kraftstoffersparnis“. Michelin Reifenwerke KgaA, Karlsruhe, 2005.
- [37] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) und Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (WRS), „Strukturstudie BW e mobil Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität“, 2010.
- [38] Daimler AG, „Datenbank Competition Information Center“. Daimler AG, 2018.
- [39] ADAC e.V., „Fahrbericht Mercedes GLC F-Cell: Elektroauto mit Brennstoffzelle“, 2018. <https://www.adac.de/der-adac/motorwelt/reportagen-berichte/auto-innovation/mercedes-glc-fuel-cell-test/> (zugegriffen am 10. Sep. 2020).
- [40] Symbiofcell, „Datenblatt HyKangoo by SymbioFCell“, 2015. http://www.symbiofcell.com/symbiof3/wp-content/uploads/2015/05/kangooZEH2_en2015-05.pdf (zugegriffen am 10. Juni 2015).
- [41] Daimler AG, „Preisliste C-Klasse T-Modell“. Daimler AG, 2018.
- [42] Daimler AG, „Foto smart electric drive“. Daimler AG, 2018.
- [43] Daimler AG, „Foto Mercedes-Benz B-Klasse F-CELL“. Daimler AG, 2018.
- [44] Daimler AG, „Mercedes-Benz präsentiert auf der IAA 2017 in Frankfurt mit dem Vorserienmodell des neuen Mercedes-Benz GLC F-CELL den nächsten Meilenstein auf dem Weg zum emissionsfreien Fahren“, 2017. https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture/Mercedes-Benz-GLC-F-CELL-X253-2017.xhtml?oid=29181774&ls=L3NIYXJjaHJlc3VsdC9zZWZyY2hyZXN1bHQueGh0bWw_c2VhcmNoU3RyaW5nPUdMQytGLUNFTWmc2VhcmNoSWQ9NiZzZWZyY2hUeXBIPWRIdGFpbG VkJnJlc3VsdEluZm9UeXBISW (zugegriffen am 12. Juli 2018).
- [45] Daimler AG, „Mercedes-Benz S 560 e, Exterieur: diamantsilber, Interieur: Leder schwarz“, 2017. https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture/EQ-Power-Neuer-Plug-in-Hybrid-Mercedes-Benz-S-560-e-Mehr-Leistung-mehr-Reichweite.xhtml?oid=29229468&ls=L3NIYXJjaHJlc3VsdC9zZWZyY2hyZXN1bHQueGh0bWw_c2VhcmNoU3RyaW5nPVMTS2xhc3NIK1BsdWctaW4mc2VhcmN (zugegriffen am 16. Juli 2018).
- [46] Daimler AG, „Mercedes-Benz C 220 d T-Modell, brillantblau metallic, Leder schwarz, Avantgarde.“, 2018. https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture/Die-neue-Mercedes-Benz-C-Klasse-Luxemburg--Moselregion-2018.xhtml?oid=40537895&ls=L3NIYXJjaHJlc3VsdC9zZWZyY2hyZXN1bHQueGh0bWw_c2VhcmNoU3RyaW5nPVMTS2xhc3NIJnNIYXJjaElkPTUmc2VhcmNoVHlwZT1kZXRhaWxlZ (zugegriffen am 17. Juli 2018).
- [47] U. Sauer und J. Kowal, „MTZ-Wissen - 7. Batterietechnik: Grundlagen und Übersicht“, *MTZ - Mot. Zeitschrift*, Bd. 73, S. Nr. 12, S. 1000 ff., 2012.
- [48] H. Wallentowitz und F. Arndt, *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [49] D. Linden und T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*, Third edit. McGraw-Hill, 2002.
- [50] K. Reif, K. E. Noreikat und K. Borgeest, *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 2012.
- [51] W. van Schalkwijk und B. Scrosati, *Advances in Lithium-Ion Batteries*. Springer US, 2007.
- [52] T. Hettesheimer, „Strategische Produktionsplanung in jungen Märkten - Ein systemdynamischer Ansatz zur Konzeption und dynamischen Bewertung von Produktionsstrategien am Beispiel der Lithium-Ionen-Traktionsbatterie“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2017.
- [53] R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
-

-
- [54] 3M Deutschland GmbH, „Flüssigkühlung von Batterien durch 3M™ Novec™ High-Tech-Flüssigkeit“, 2020. https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/automobilelektronik/losungen/fluessigkuehlung-von-batterien/ (zugegriffen am 14. März 2020).
- [55] H. Tschöke, *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs Basiswissen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [56] J. Kleemann, „Einflüsse der Gasdiffusionslage auf Leistungsdichte und Kosten der PEM-Brennstoffzelle“, Dissertation, Universität Ulm, 2012.
- [57] P. Kurzweil, *Brennstoffzellentechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [58] K. Reif, *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe mit Brennstoffzellen und alternativen Kraftstoffen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [59] U.S. Department of Energy, „Fuel Cell Electric Vehicle Composite Data Products“, 2019. <https://www.nrel.gov/hydrogen/fuel-cell-electric-vehicle-cdps.html> (zugegriffen am 07. Aug. 2018).
- [60] Mercedes-Benz Fuel Cell GmbH, „Mercedes-Benz FuelCell“, *Homepage*, 2018. <https://www.mercedes-benz-fuelcell.com/produkt-technologie> (zugegriffen am 09. Aug. 2018).
- [61] M. März und B. Eckard, „Vorlesungsskript Wintersemester 2016/17: Leistungselektronik im Fahrzeug und Antriebsstrang“, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2016.
- [62] J. Liebl *et al.*, *Energiemanagement im Kraftfahrzeug*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [63] E. Bolte, *Elektrische Maschinen*. Berlin, Heidelberg: SpringerVieweg, 2017.
- [64] A. Binder, *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Berlin, Heidelberg: SpringerVieweg, 2017.
- [65] P. A. Tipler und G. Mosca, *Physik*, 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [66] J. Teigelkötter, *Energieeffiziente Antriebe*. Wiesbaden: Springer+Teubner Verlag, 2013.
- [67] D. Schröder, *Elektrische Antriebe – Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: SpringerVieweg, 2017.
- [68] N. Karras, „Optimierung der Wärmeabfuhr eines Fahrzeug-Elektromotors und Auswirkungen auf den Gesamtkühlkreislauf“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2017.
- [69] J. Doerr, T. Attenesperger, L. Wittmann und T. Enzinger, „Die neuen elektrischen Achsantriebe von Audi“, *ATZelektronik*, Bd. 13, Nr. 3, S. 16–27, 2018.
- [70] B. Hollweck *et al.*, „Investigation of the holistic energy demand of different power train topologies under realistic boundary conditions“, in *18. Internationales Stuttgarter Symposium Conference Proceedings*, M. Bargende, H. Reuss, und J. Wiedemann, Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018, S. 425–442.
- [71] Daimler AG, „Mercedes-Benz C-Klasse: Elektromotor des C 300 BlueTEC HYBRID“, 2014. https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture.xhtml?oid=7526133&ls=L3NIYXJjaHJlc3VsdC9zZWFFyY2hyZXN1bHQeGh0bWw_c2VhcmNoU3RyaW5nPWVsZWt0cm9tb3RvcjZzZWFFyY2hJZD0wJnNlYXJjaFR5cGU9ZGV0YWlsZWQmcmVzdWx0SW5mb1R5cGVJZD0xNzlmYm9yZGVycy10cnVlJnRodW1iU2 (zugegriffen am 09. Aug. 2018).
- [72] G. P. Merker und R. Teichmann, *Grundlagen Verbrennungsmotoren*. Wiesbaden: SpringerVieweg, 2014.
- [73] R. Edwards, J.-F. Larivé, D. Rickeard und W. Weindorf, „WELL-TO-TANK Appendix 1 - Version 4a“, Ispra, 2014.
- [74] Joint Research Centre, „TANK-TO-WHEELS Report v5 (vorläufiger Stand)“, Ispra, 2018.
- [75] Daimler AG, „Kurzfassung: Die neue Mercedes-Benz A-Klasse: Der Maßstab in der Kompaktklasse“, 2018. <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko.xhtml?oid=32997009> (zugegriffen am 08. Aug. 2018).
- [76] Daimler AG, „Zylinderabschaltung, 4-Zylinder-Benzinmotor M282“, 2018. https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture/Mercedes-Benz-A-Klasse-W177-2018.xhtml?oid=32971618&ls=L3NIYXJjaHJlc3VsdC9zZWFFyY2hyZXN1bHQeGh0bWw_c2VhcmNoU3RyaW5nPWV0ODImc2VhcmNoSWQ9MiZzZWFFyY2hUeXBIPWRldGFpbGVkVmJvcmlcnM9dHJ1ZSZyZXN1bHRJbWZv (zugegriffen am 08. Aug. 2018).
- [77] R. Van Basshuysen und F. Schäfer, *Handbuch Verbrennungsmotor*. Wiesbaden: SpringerVieweg, 2017.
- [78] R. Fischer *et al.*, *Das Getriebebuch*. Wien: Springer-Verlag, 2012.
-

-
- [79] Daimler AG, „Mercedes-AMG C 63 Automatikgetriebe AMG SPEEDSHIFT MCT 9G“, 2018. https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture/Mercedes-AMG-C-63-2018-BR205.xhtml?oid=40752511&ls=L3NIYXJjaHJlc3VsdC9zZWYyY2hyZXN1bHQeGh0bWw_c2VhcmNoU3RyaW5nPWV1dG9tYXRpa2dldHJpZWJlJnNIYXJjaElkPTQmc2VhcmNoVHlwZT1kZXRhaWxlZCZyZXN1bHRJbWZvVHlw (zugegriffen am 07. Aug. 2018).
- [80] Daimler AG, „Mercedes-AMG SLC 43; AMG Hinterachs-Sperrdifferenzial, mechanisch“, 2016. https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/picture/Mercedes-AMG-SLC-43-R-172-2015.xhtml?oid=10004676&ls=L3NIYXJjaHJlc3VsdC9zZWYyY2hyZXN1bHQeGh0bWw_c2VhcmNoU3RyaW5nPXNwZXJyZGlmZmVyZW50aWVsJnNIYXJjaElkPTUmc2VhcmNoVHlwZT1kZXRhaWxlZCZyZXN1bHRJbWZvVHlw (zugegriffen am 07. Aug. 2018).
- [81] S. Kabelac *et al.*, *VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [82] S. Pischinger, P. Genender, S. Klopstein und D. Hemkemeyer, „Aufgaben beim Thermomanagement von Hybrid- und Elektrofahrzeugen“, *ATZ - Automob. Zeitschrift*, Bd. 116, Nr. 4, S. 54–59, 2014.
- [83] G. Homann, „Energieeffizientes Heizen eines E-Fahrzeugs“, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2015.
- [84] S. Wagner, „Idealisierte energetisch-analytische Abbildungsmethode der Temperaturschichtung bei der passiven Aufheizung in der Fahrzeugkabine“, in *PKW-Klimatisierung VI*, Essen: expert verlag, 2009, S. 94–110.
- [85] M. Wawzyniak und A. Wiebelt, „Thermomanagement für elektrifizierte Fahrzeuge“, *MTZ - Mot. Zeitschrift*, Bd. 77, Nr. 5, S. 42–49, 2016.
- [86] H. Großmann, *Pkw-Klimatisierung*, 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [87] Behr Hella Services GmbH, „Fahrzeugklimatisierung: Kompaktes Wissen für die Werkstatt“, Schwäbisch Hall, o. J..
- [88] Verein Freier Ersatzteilemarkt e.V., „mein-autolexikon.de“, *Klimaanlage*, 2019. <https://www.mein-autolexikon.de/heizungsklima/klimaanlage.html> (zugegriffen am 18. März 2019).
- [89] L. Mardorf und P. Menger, „PKW-Klimaanlage mit Wärmepumpenmodus für Elektrofahrzeuge. Vergleich der Kältemittel R1234yf und R134a“, Magdeburg, 2010.
- [90] Eberspächer Climate Control Systems GmbH & Co. KG, „Produkte Eberspächer“, 2019. <https://www.eberspaecher.com/produkte/electrical-heaters.html> (zugegriffen am 09. Apr. 2019).
- [91] Eberspächer Climate Control Systems GmbH & Co. KG, „Bilder Electrical Heaters“, *Bilder Electrical Heaters*, 2019. <https://www.eberspaecher.com/presse/medienservice/bilder/elektrische-fahrzeugheizungen.html> (zugegriffen am 18. März 2019).
- [92] Gamma Technologies LLC, „GT-SUITE (Version 2018.1.0001)“. 2018.
- [93] B. Hollweck, C. Schnapp und T. Kachelriess, „Holistic Energy Analysis of Various Drivetrain Topologies Close to Reality“. European GT Conference, Frankfurt, 2017.
- [94] B. Hollweck *et al.*, „Energy Analysis of Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs) under European Weather Conditions and Various Driving Behaviors“, *Fuel Cells*, Bd. 18, Nr. 5, S. 669–679, Okt. 2018.
- [95] B. Hollweck *et al.*, „Analyses of the holistic energy balance of different fuel cell powertrains under realistic boundary conditions and user behaviors“, *Int. J. Hydrogen Energy*, Bd. 44, Nr. 35, S. 19412–19425, Juli 2019.
- [96] infas - Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. und Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung, „MiD 2008 - Mobilität in Deutschland 2008“, Bonn und Berlin, 2008.
- [97] ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH und W. Knörr, „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs Basisdaten Deutschland“, Heidelberg, 2004.
- [98] M. Moullion, „Analyse der Energiebilanz alternativer Antriebe Hybridfahrzeuge (Brennstoffzellen-, Batterie-, und Hybridfahrzeuge)“, Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2016.
- [99] icct - International Council on Clean Transportation Europe, „EUROPEAN VEHICLE MARKET STATISTICS Pocketbook 2016/17“, Berlin, 2016.
- [100] IHS Automotive, „IHS Automotive Vehicle Sales Bodytype Forecast: Daimler AG“. IHS Automotive, 2016.
- [101] A2MAC1 EURL, „Datenbank A2Mac1 - Automotive Benchmarking“. 2018.
- [102] Partex Global GmbH, „Homepage www.pkwteile.de“, 2017. <https://www.pkwteile.de/> (zugegriffen am 01. Mai 2017).
-

-
- [103] Rat der Europäischen Gemeinschaften, *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften* 92/21/EWG, Bd. 1992, Nr. L. 1992, S. 10.
- [104] S. Herrmann, „Gesamtheitliche Verbrauchssimulation verschiedener Pkw-Topologien mit dem Schwerpunkt auf den Plug-In- Hybrid“, Bachelorarbeit, Hochschule Ansbach, 2018.
- [105] M. Ball, A. Basile und T. N. Veziroglu, *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy*, 4. Aufl. Elsevier Science, 2015.
- [106] M. Mitschke und H. Wallentowitz, *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Braunschweig: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [107] G. Opfer, *Numerische Mathematik für Anfänger: Eine Einführung für Mathematiker, Ingenieure und Informatiker*. Vieweg+Teubner Verlag, 2013.
- [108] M. Christ, „Aufbereitung und Validierung von Klimadatensätzen für die Simulation des Energiebedarfs der Fahrzeugklimatisierung“, Projektarbeit, Hochschule Offenburg, 2016.
- [109] Eurostat, *Regions in the European Union: Nomenclature of territorial units for statistics NUTS 2013 / EU-28*. 2015.
- [110] Europäische Kommission, „eurostat“, 2016. <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (zugegriffen am 26. Feb. 2016).
- [111] Meteotest AG, „Meteonorm (Version 7.0)“. Meteotest AG, Bern, 2015.
- [112] T. Korb, „Analyse der Energiebilanz elektrischer und hybrider Antriebe hinsichtlich des Reichweiteneinflusses der Klimatisierung im Vergleich zu konventionellen Antrieben“, Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2016.
- [113] GeoBasis-DE und Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, „NUTS-Gebiete 1:250 000 Datenstand: 31.12.2019“. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2019.
- [114] Daimler AG, „Parameter Kabinenbedatung“. Daimler AG, 2016.
- [115] F. M. Al-Hafez, „Analyse der Energiebilanz elektrischer Antriebe (Hybrid-, Plug-In-Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug) im Vergleich zu konventionellen Antrieben“, Bachelorarbeit, Technische Universität Braunschweig, 2017.
- [116] B. Heißing, M. Ersoy und S. Gies, *Fahrwerkhandbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [117] G. Leister, *Fahrzeuigräder – Fahrzeugreifen*. Schwaigern: Springer Vieweg, 2015.
- [118] Rat der Europäischen Union, *Verordnung 1222/2009/EG*. 2009, S. 13.
- [119] Rat der Europäischen Union, *Verordnung 661/2009/EG*. 2009, S. 24.
- [120] H. E. Friedrich, *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [121] U. Knorra, „Leichtbau-Batteriepack aus Forta H1000 von Outokumpu für Elektrofahrzeuge“, *Springer Professional Onlineartikel Leichtbau Nachricht*, Springer Professional, S. 1, 2016.
- [122] G. Frank, „Brennstoffzellentechnik bei Daimler“, *Seminar Erneuerbare Energien 2018*. Daimler AG, Karlsruhe, 2018.
- [123] T. Pregger *et al.*, „Perspektiven von Elektro- / Hybridfahrzeugen in einem Versorgungssystem mit hohem Anteil dezentraler und erneuerbarer Energiequellen“, 2012.
- [124] E. Briec und B. Müller, *Electric Vehicle Batteries: Moving from Research towards Innovation*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [125] J. Lehold und Volkswagen AG, „Welche Herausforderungen müssen alternative Fahrzeugantriebe begegnen?“ Volkswagen AG, o. J..
- [126] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), „Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion AG 2 – Batterietechnologie“, 2016.
- [127] A. Thielmann, A. Sauer, R. Isenmann und M. Wietschel, „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“, *Schriftenr. des Fraunhofer ISI*, Bd. 1, Nr. 5, S. 36, 2012.
- [128] A. Perujo, G. Van und H. Scholz, „Present and Future Role of Battery Electrical Vehicles in Private and Public Urban Transport“, *New Generation of Electric Vehicles*. 2012.
- [129] M. Blesl *et al.*, „Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität“, Stuttgart, 2009.
- [130] W. Braun, M. Schiemann und P. Birke, „Batterien für Elektromobilität gestern - heute - morgen Energie – und Klimaschutz aktuelle Entwicklungstrends“. Continental AG, S. 47, 2010.
- [131] ERTRAC, EPoSS und ETIP SNET, „European Roadmap Electrification of Road Transport Status: final for publication“, 2017.
- [132] RECHARGE aisbl., „E-mobility Roadmap for the EU battery industry The European Association for Advanced Rechargeable Batteries“, Brüssel, 2013.
- [133] Deutsche Accumotive GmbH, „Parameter Batteriesysteme“. Deutsche Accumotive GmbH, Kirchheim unter Teck, 2017.
- [134] A. Thielman *et al.*, „Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien“, Karlsruhe, 2017.
-

-
- [135] SAE International, *Testing Performance of Fuel Cell Systems for Automotive Applications*. 2011, S. 44.
- [136] US Department of Energy, „Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan: 3.4 Fuel Cells“, *Fuel Cell Technol. Off.*, Bd. 2015, S. 3.4.1-3.4.58, 2017.
- [137] A. Bosco, „Latest Fuel Cell Stack Developments“. General Motors Company, o. J..
- [138] U.S. Department of Energy, „Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan Paving the way toward a hydrogen energy future“, 2007.
- [139] U.S. Department of Energy, „FY 2016 Annual Progress Report for Electric Drive Technologies Program“, 2017.
- [140] U. S. Department of Energy, „Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan - Technical Plan - 3.4 Fuel Cells“, in *Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan*, Nr. June 2011, U.S. Department Of Energy, 2012, S. 1–49.
- [141] U.S. DRIVE Partnership, „Fuel Cell Technical Team Roadmap“, 2017.
- [142] SAE China und Society of Automotive Engineers of China, „Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap“, 2015.
- [143] A. Moawad und A. Rousseau, „Impact of Electric Drive Vehicle Technologies on Fuel Efficiency“, Argonne, 2012.
- [144] U.S. Department of Energy, „Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan“, 2005.
- [145] U.S. Department of Energy, „Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies Program“, 2002.
- [146] U.S. Department of Energy, „Breakthrough vehicle development“, 2004.
- [147] M. Zolot, T. Markel und A. Pesaren, „Analysis of Fuel Cell Vehicle Hybridization and Implications for Energy Storage Devices“, *4th Int. Adv. Automot. Batter.*, S. 21, 2004.
- [148] BRUSA Elektronik AG, „BDC546 - Bidirectional 750 V DC / DC-Converter The new benchmark in power density“. BRUSA Elektronik AG, 2015.
- [149] M. Matsunaga, T. Fukushima und K. Ojima, „Powertrain system of Honda FCX clarity fuel cell vehicle“, *World Electr. Veh. J.*, Bd. 3, Nr. 4, S. 820–829, 2009.
- [150] Toyota Motor Corporation, „Toyota Technical Review Vol. 61“, 2015.
- [151] D. L. Greene und G. Duleep, „Status and Prospects of the Global Automotive Fuel Cell Industry and Plans for Deployment of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Refueling Infrastructure“, 2013.
- [152] FCH JU - Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, „Multi - Annual Work Plan 2014 - 2020“, 2014.
- [153] U.S. Department of Energy, „3.3 Hydrogen Storage“, in *Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan*, U.S. Department of Energy, 2015, S. 3.3.1-3.3.23.
- [154] U.S. DRIVE Partnership, „Hydrogen Storage Tech Team Roadmap“, 2017.
- [155] U.S. DRIVE Partnership, „Target Explanation Document: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles“, 2015.
- [156] L. Jörissen, „Elektromobilität mit Brennstoffzellen und Batterie“, in *9. Isnyer Energiegipfel*, 2016, S. 39.
- [157] Hyundai Motor Company, „ix35 Fuel Cell“. Hyundai Motor Company, S. 10, 2015.
- [158] W. Fichtner, P. Jochem, W.-R. Poganietz und A. Grunwald, *Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen Tagungsbeiträge*. KIT Scientific Publishing, 2012.
- [159] D. Stolten, „Brennstoffzellen für mobile Anwendungen Wo stehen wir auf dem Weg zur mobilen Anwendung?“ Forschungszentrum Jülich GmbH, 2010.
- [160] U. Möhrstädt und J. Grotendorst, „Komponenten für Antriebsstrangelektrifizierung“, *Schaeffler KOLLOQUIUM 2010*, S. 334–343, 2010.
- [161] S. Rogers, „Advanced Power Electronics and Electric Motors (APEEM) R & D Program Overview Office Of Vehicle Technologies“. 2011.
- [162] B. Ozipineci und G. Smith, „Electric Drive Technologies Roadmap Update“. Oak Ridge National Laboratory, 2017.
- [163] U.S. DRIVE Partnership, „Electrical and Electronics Technical Team Roadmap“, 2017.
- [164] EE TECH TEAM, „Advanced Power Electronics and Electric Machines“, 2004.
- [165] U.S. Department of Energy, „Advanced Power Electronics and Electric Motors Program 2013“, 2013.
- [166] S. Rogers und S. Boyd, „Overview of the DOE Advanced Power Electronics and Electric Motor R & D Program APEEM R & D Program“. U.S. Department of Energy, 2014.
-

-
- [167] J. M. Miller, „Electric Motor R&D“. U.S. Department of Energy, 2013.
- [168] T. A. Burress *et al.*, „Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System“, U.S. Department of Energy, 2011.
- [169] B. M. Conlon *et al.*, „The Next Generation “Voltec” Extended Range EV Propulsion System“, *SAE Int. J. Altern. Powertrains*, Bd. 4, Nr. 2, S. 19, 2015.
- [170] C. Schnapp, „Analyse der gesamtheitlichen Energiebilanz elektrischer und Hybrider Antriebe im Vergleich zu konventionellen Antrieben“, Masterarbeit, Universität Stuttgart, 2017.
- [171] Daimler AG, „Fachabteilung Simulation Kühlkreislauf“. Daimler AG, Kirchheim unter Teck, 2016.
- [172] P. Keil und A. Jossen, „Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen“, 2012.
- [173] M. Konz, N. Lemke, S. Försterling und M. Eghtessad, „Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge“, *FAT Schriftenr.*, Bd. 233, S. 1–100, 2011.
- [174] Deutsche Accumotive GmbH, „Validierte Batteriemodelle“. Deutsche Accumotive GmbH, Kirchheim unter Teck, 2017.
- [175] J. Beulshausen, „Thermomanagement als Maßnahme zur Reibungsreduktion von Verbrennungsmotoren“, Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2014.
- [176] Daimler AG, „Messdaten eines Brennstoffzellensystems“. Daimler AG, Kirchheim unter Teck, 2017.
- [177] BRUSA Elektronik AG, „DMC5 - High power inverter“. BRUSA Elektronik AG, 2015.
- [178] Daimler AG, „Messdaten Elektrische Antriebseinheit“. Daimler AG, Kirchheim unter Teck, 2017.
- [179] U. Vollmer, „Entwurf, Auslegung und Realisierung eines verlustoptimierten elektrischen Antriebs für Hybridfahrzeuge“, Dissertation, Technischen Universität Berlin, 2012.
- [180] FEV Europe GmbH, „Datenbank Fremdmotorenanalyse“. FEV Europe GmbH, 2018.
- [181] G. Lux, S. Winter, P. Hofmann und B. Geringer, „Thermomanagement zur Verbrauchsabsenkung in Hybridantriebssträngen“, in *Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VI*, P. Steinberg, Hrsg. Renningen: Expert-Verlag, 2008, S. 69–85.
- [182] F. Maassen, „Tribologie - Reibung“, in *Handbuch Verbrennungsmotor*, R. Van Basshuysen und F. Schäfer, Hrsg. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 439–454.
- [183] P. J. Shayler, S. J. Christian und T. Ma, „A Model for the Investigation of Temperature, Heat Flow and Friction Characteristics During Engine Warm-Up“, *SAE Tech. Pap.*, Apr. 1993.
- [184] Daimler AG, „Gradientenkennfeld Verbrennungsmotor“. Daimler AG, 2017.
- [185] U. Spicher, B. Feng und A. Kölmel, „Forschungsbericht FZKA-BWPLUS HC-Rohemissionen beim Kaltstart in der Warmlaufphase sowie bei Last- und Drehzahlsprüngen“, 1999.
- [186] R. Golloch, *Downsizing bei Verbrennungsmotoren*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [187] H. Neumaier, „Abgaskrümmen“, in *Handbuch Verbrennungsmotor*, Springer Vieweg, 2015, S. 333–355.
- [188] A. Koch, M. Hiller und T. Borsdorf, „Turbolader mit wassergekühltem Aluminium-Turbinengehäuse“, *MTZ - Mot. Zeitschrift*, Nr. 11, S. 46–51, 2014.
- [189] H. Aghaali, „On-Engine Turbocharger Performance Considering Heat Transfer“, 2012.
- [190] G. Cerbe und G. Wilhelms, *Technische Thermodynamik*. München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [191] Daimler AG, „Generator Kennlinien“. Daimler AG, 2017.
- [192] M. L. Janssen und G. L. Hall, „Effect of Ambient Temperature on Radial Tire Rolling Resistance“, *SAE Tech. Pap.*, S. 8, Feb. 1980.
- [193] D. J. Schuring, J. F. Siegfried und G. L. Hall, „Transient Speed and Temperature Effects on Rolling Loss of Passenger Car Tires“, *SAE Tech. Pap.*, S. 11, 1985.
- [194] D. Watzlaw, „Simulation des Reifen-Rollwiderstandes unter Straßen- und Prüfstandsbedingungen in Abhängigkeit von Reifentemperatur und Geschwindigkeit“, Diplomarbeit, FH Bielefeld, 2006.
- [195] Société de Technologie Michelin, „The tyre, Rolling resistance and fuel savings“, 2003.
- [196] J. Hofhaus, „Idealisierte energetisch-analytische Abbildungsmethode der Temperaturschichtung bei der passiven Aufheizung in der Fahrzeugkabine“, in *PKW-Klimatisierung VI*, Haus der Technik, Hrsg. expert verlag, 2009, S. 94–110.
- [197] F. Schüppel, „Optimierung des Heiz- und Klimakonzepts zur Reduktion der Wärme- und Kälteleistung im Fahrzeug“, Dissertation, Technischen Universität Berlin, 2015.
- [198] Deutsches Institut für Normung (DIN), „DIN 1946-3:2006-07 Raumlufttechnik - Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen“, S. 17, 2006.
- [199] Daimler AG, „Aufwärm- und Abkühlverhalten Fahrgastzelle“. Daimler AG, 2016.
- [200] Verband der Automobilindustrie E.V. (VDA), *Standardaufheizung für Pkw mit 1 bis 2 Sitzreihen*. 2005.
-

-
- [201] F. Bohlender und H. Reiss, „Elektrische Innenraumheizung von E-Fahrzeugen per PTC-System“, *Automob. Zeitschrift*, Bd. 2, S. 120–125, 2013.
- [202] B. Geringer und W. Tober, „Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis - Kosten, Reichweite, Umwelt, Komfort“, 2012.
- [203] B. Geringer und W. K. Tober, „Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis - Datenanhang“, 2012.
- [204] G. Kolls, „Energy balance analyses for electric drivetrains (BEV, FCEV, PHEV and HEV) compared to conventional drivetrains“, Bachelorarbeit, Bergische Universität Wuppertal, 2016.
- [205] K. Reif, *Autoelektrik und Autoelektronik*. Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [206] T. Neuner, „Analyse der gesamtheitlichen Energiebilanz elektrifizierter Antriebe im Vergleich zu herkömmlichen Antriebskonzepten – Fuel Cell Range Extended Electric Vehicle –“, Bachelorarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, 2017.
- [207] Daimler AG, „CFD-Daten Luftmassenstrom“. Daimler AG, 2016.
- [208] A. Kolb, „Vorlesungsunterlagen: Kfz-Klimatisierung / Kältetechnik SoSe 2004“. Technische Universität München, München, 2004.
- [209] O. Käfer, „Pkw-Klimatisierung - Umluftautomatik mit Feuchteregelung im Fahrzeuginnenraum“, *ATZ - Automob. Zeitschrift*, Bd. 100, Nr. 6, 1998.
- [210] M. Arndt, M. Sauer und M. Wolz, „Verbrauchssenkung durch verbesserte Klimaanlage-Regelung. Bedarfsgerechte Lüftung mit dem Climate-Control-Sensor“, *ATZ - Automob. Zeitschrift*, Bd. 109, Nr. 5, S. 404–410, 2007.
- [211] M. Markowitz, „Belüftungsregelung zur effizienten Aufheizung des Fahrzeuginnenraums“, in *Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VIII. Energiemanagement*, P. Steinberg, Hrsg. Renningen: Expert-Verlag, S. 199–211.
- [212] F. Stöber, „Analyse des energetischen Einflusses einer Wärmepumpe auf ein batterieelektrisches Fahrzeug der Mittelklasse“, Projektarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2018.
- [213] M. Christ, „Analyse der Energiebilanz zukünftiger Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge“, Bachelorarbeit, Hochschule Offenburg, 2017.
- [214] P. R. Akula, L. Jandhyala, F. Herb und A. Narayana, „Development of Energy Management Strategies and Analysis with Standard Drive Cycles for Fuel Cell Electric Vehicles“, *SAE Int.*, S. 11, 2012.
- [215] M. Pfau, „Modellierung und energetische Analyse konventioneller PKW-Antriebe im Kontext zukünftiger Antriebskonzepte“, Masterarbeit, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 2017.
- [216] Wirtschaftskommission für Europa, *Regelung Nr. 83 Revision 3 Regelung Nr. 83 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN / ECE)*. 2006, S. 369.
- [217] F. Jacobi, „Leitfaden für die Errichtung von öffentlichen Ladepunkten der Elektromobilität im Land Mecklenburg-Vorpommern“, Stralsund, 2019.
- [218] P. Rosenzweig, *Der Halo-Effekt: wie Manager sich täuschen lassen*. Offenbach: GABAL Verlag GmbH, 2008.
- [219] Fisch und Fischl GmbH, „www.spritmonitor.de“, 2019. <https://www.spritmonitor.de> (zugegriffen am 14. Okt. 2019).
- [220] Deutscher Wetterdienst, „Klimatafel von Oslo (Stadt) / Norwegen“, 2020.
- [221] European Kommission, „STATISTICAL POCKETBOOK 2018 EU TRANSPORT in figures“, 2018.
- [222] Bibliographisches Institut GmbH, „Dudenverlag“. <https://www.duden.de/suchen/dudenonline/anthropogen> (zugegriffen am 19. Jan. 2019).
-

Anhang

Anhang 1 Übersicht über die statischen und dynamischen Anforderungen an die Fahrleistung für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 1	XXXV
Anhang 2 Reichweitenanforderung und Leistungsbereitstellung in dem Zertifizierungszyklus für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 1	XXXV
Anhang 3 Übersicht über die statischen und dynamischen Anforderungen an die Fahrleistung für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 3	XXXVI
Anhang 4 Reichweitenanforderung und Leistungsbereitstellung in dem Zertifizierungszyklus für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 3	XXXVI
Anhang 5 Dimensionsloser Rollwiderstandsbeiwert verschiedener Reifentypen über der Fahrzeuggeschwindigkeit, vgl. [4]	XXXVII
Anhang 6 Inputparameter der Fahrgastzellen Segment 1, Segment 2 und Segment 3 [114]	XXXVIII
Anhang 7 Statische Validierung des BEV/REEV-Batteriemodells mit Kühlmittelmassenstrom	XXXIX
Anhang 8 Statische Validierung des BEV/REEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelmassenstrom	XL
Anhang 9 Statische Validierung des PHEV-Batteriemodells mit Kühlmittelmassenstrom	XLI
Anhang 10 Statische Validierung des PHEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelmassenstrom	XLII
Anhang 11 Statische Validierung des HEV-Batteriemodells mit Kühlmittelvolumenstrom	XLIII
Anhang 12 Statische Validierung des HEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelvolumenstrom	XLIV
Anhang 13 Transiente Validierung des BEV/REEV-Batteriemodells mit Kühlmittelmassenstrom	XLV
Anhang 14 Transiente Validierung des BEV/REEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelmassenstrom	XLV
Anhang 15 Transiente Validierung des PHEV-Batteriemodells mit Kühlmittelmassenstrom	XLVI
Anhang 16 Transiente Validierung des PHEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelmassenstrom	XLVI
Anhang 17 SOC-Verlauf mit Start-Zelltemperatur von 20 °C a) stationäres und b) transientes Profil	XLVII
Anhang 18 Übersicht über die angenommenen Nebenverbraucherleistungen 2015, Leistungen definiert und aus [48], [202]	XLVIII
Anhang 19 Übersicht über die angenommenen Nebenverbraucherleistungen 2025, Leistungen definiert und aus [48], [202]	XLVIII
Anhang 20 Fahrzeugvarianten Segment 1: Vergleich der Verbrauchsangaben in dem NEFZ, Daten aus [38]	XLIX
Anhang 21 Fahrzeugvarianten Segment 2: Vergleich der Verbrauchsangaben in dem NEFZ, Daten aus [38]	L
Anhang 22 Fahrzeugvarianten Segment 3: Vergleich der Verbrauchsangaben in dem NEFZ, Daten aus [38]	LI
Anhang 23 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des ersten Segments in dem Innerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug	LII
Anhang 24 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des ersten Segments in dem Außerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug	LIII
Anhang 25 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des ersten Segments in dem Autobahnzyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug	LIV
Anhang 26 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des dritten Segments in dem Innerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug	LV

- Anhang 27 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des dritten Segments in dem Außerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug LVI
- Anhang 28 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des dritten Segments in dem Autobahnzyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug LVII
-

Anhang 1 Übersicht über die statischen und dynamischen Anforderungen an die Fahrleistung für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 1

Merkmal	Statische Anforderung			Dynamische Anforderung					
	Höchstgeschwindigkeit in km/h			Beschleunigungszeit 0 km/h -100 km/h in s			Elastizität 80 km/h -120 km/h in s		
	VM	EM		VM	EM		VM	EM	
BAT		BZ	BAT		BZ	BAT		BZ	
BEV		133			12,6			10,1	
FCEV		-	150		12,6			10,1	
FC-PHEV		120	150		12,6			10,1	
FC-REEV		133	120		12,6			10,1	
ICE-G- / ICE-D-Fzg	172			12,6			10,1		

BAT: Batterie BZ: Brennstoffzelle EM: Elektromotor Fzg: Fahrzeug VM: Verbrennungsmotor

Referenzfahrzeugbildung	Marktübliche Werte					
Validierte Antriebsauslegung	xEV-Datenrecherche	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Nicht vorhanden</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>Keine Anforderung</td> </tr> </table>		Nicht vorhanden	-	Keine Anforderung
	Nicht vorhanden					
-	Keine Anforderung					

Anhang 2 Reichweitenanforderung und Leistungsbereitstellung in dem Zertifizierungszyklus für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 1

Merkmal	Statische Anforderung			Dynamisches Fahrprofil NEFZ					
	Reichweite in km			Spitzenleistung			Durchschnittsleistung		
	VM	EM		VM	EM		VM	EM	
BAT		BZ	BAT		BZ	BAT		BZ	
BEV		170			x			x	
FCEV		-	350		x	x		x	x
FC-PHEV		35	315		x	x		x	x
FC-REEV		56	294		x	-		x	x
ICE-G- / ICE-D-Fzg	822			x			x		

BAT: Batterie BZ: Brennstoffzelle EM: Elektromotor Fzg: Fahrzeug VM: Verbrennungsmotor

Referenzfahrzeugbildung	MiD-Fahrverteilung							
Reichweitenvorgabe	xEV-Datenrecherche	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Nicht vorhanden</td> </tr> <tr> <td>x</td> <td>Anforderung</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>Keine Anforderung</td> </tr> </table>		Nicht vorhanden	x	Anforderung	-	Keine Anforderung
	Nicht vorhanden							
x	Anforderung							
-	Keine Anforderung							

Anhang 3 Übersicht über die statischen und dynamischen Anforderungen an die Fahrleistung für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 3

Merkmal	Statische Anforderung			Dynamische Anforderung					
	Höchstgeschwindigkeit in km/h			Beschleunigungszeit 0 km/h -100 km/h in s			Elastizität 80 km/h -120 km/h in s		
	VM	EM		VM	EM		VM	EM	
BAT		BZ	BAT		BZ	BAT		BZ	
BEV		180			7,2			4,9	
FCEV		-	210		7,2			4,9	
FC-PHEV		140	210		7,2			4,9	
FC-REEV		180	140		7,2			4,9	
ICE-G- / ICE-D-Fzg	239			7,2			4,9		

BAT: Batterie BZ: Brennstoffzelle EM: Elektromotor Fzg: Fahrzeug VM: Verbrennungsmotor

Referenzfahrzeugbildung	Marktübliche Werte	⊗	Nicht vorhanden
Validierte Antriebsauslegung	xEV-Datenrecherche	-	Keine Anforderung

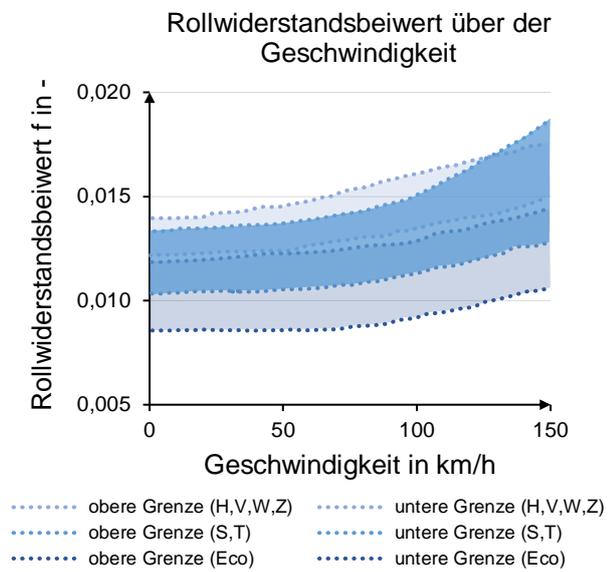
Anhang 4 Reichweitenanforderung und Leistungsbereitstellung in dem Zertifizierungszyklus für das Betrachtungsjahr 2015 an dem Beispiel des Segments 3

Merkmal	Statische Anforderung			Dynamisches Fahrprofil NEFZ					
	Reichweite in km			Spitzenleistung			Durchschnittsleistung		
	VM	EM		VM	EM		VM	EM	
BAT		BZ	BAT		BZ	BAT		BZ	
BEV		300			x			x	
FCEV		-	600		x	x		x	x
FC-PHEV		81	519		x	x		x	x
FC-REEV		188	412		x	-		x	x
ICE-G- / ICE-D-Fzg	877			x			x		

BAT: Batterie BZ: Brennstoffzelle EM: Elektromotor Fzg: Fahrzeug VM: Verbrennungsmotor

Referenzfahrzeugbildung	MiD-Fahrverteilung	⊗	Nicht vorhanden
Reichweitenvorgabe	xEV-Datenrecherche	x	Anforderung
		-	Keine Anforderung

Anhang 5 Dimensionsloser Rollwiderstandsbeiwert verschiedener Reifentypen über der Fahrzeuggeschwindigkeit, vgl. [4]



Anhang 6 Inputparameter der Fahrgastzellen Segment 1, Segment 2 und Segment 3 [114]

Fahrgastzelle		Segment 1	Segment 2	Segment 3	Einheit
Kabinenluft	Volumen	1,5	3	3,5	m ³
Einbauten	Fläche	3	5	6	m ²
	Volumen	0,14	0,24	0,24	m ³
	Masse	29,9	64,4	72,1	kg
	Dichte	208	273	295	kg/m ³
	Spez. Wärmekapazität	1219	1219	1219	J/(kgK)
	Wärmeleitfähigkeit	0,08	0,08	0,08	W/(mK)
	Absorption	0,8	0,8	0,8	-
	Emission	0,8	0,8	0,8	-
Anstellwinkel	90	90	90	°	
Dach	Fläche	1364	2572	1956	m ²
	Masse	18,7	35,2	26,8	kg
	Dichte	274	274	274	kg/m ³
	Stärke	0,05	0,05	0,05	m
	Spez. Wärmekapazität	817	817	817	J/(kgK)
	Wärmeleitfähigkeit	0,12	0,12	0,12	W/(mK)
	Absorption	0,85	0,85	0,85	-
	Emission	0,85	0,85	0,85	-
Anstellwinkel	84,3°	84,3°	84,3°	°	
Türen	Fläche	2.571	3,83	3,17	m ²
	Masse	32,4	48,3	39,9	kg
	Stärke	0,05	0,05	0,05	m
	Dichte	252	252	252	kg/m ³
	Spez. Wärmekapazität	845	845	845	J/(kgK)
	Wärmeleitfähigkeit	0,134	0,134	0,134	W/(mK)
	Absorption	0,85	0,85	0,85	-
	Emission	0,85	0,85	0,85	-
Boden	Fläche	2,1	2,7	2,8	m ²
	Masse	53,8	69,2	71,8	kg
	Stärke	0,05	0,05	0,05	m
	Dichte	513	513	513	kg/m ³
	Spez. Wärmekapazität	661	661	661	J/(kgK)
	Wärmeleitfähigkeit	0,075	0,075	0,075	W/(mK)
Frontscheibe	Emission	0,85	0,85	0,85	-
	Anstellwinkel	34,24	29,54	28,91	°
	Fläche	0,778	1,031	0,934	m ²
	Masse	9,72	12,89	11,67	kg
	Stärke	0,005	0,005	0,005	m
	Dichte	2500	2500	2500	kg/m ³
	Spez. Wärmekapazität	840	840	840	J/(kgK)
	Wärmeleitfähigkeit	0,76	0,76	0,76	W/(mK)
	Absorption	0,43	0,43	0,43	-
	Emission	0,89	0,89	0,89	-
Heckscheibe	Transmission	0,5	0,5	0,5	-
	Anstellwinkel	60,95	52,6	25,56	°
	Fläche	0,314	0,316	0,725	m ²
	Masse	2,36	2,37	5,44	kg
	Stärke	0,003	0,003	0,003	m
	Dichte	2500	2500	2500	kg/m ³
	Spez. Wärmekapazität	840	840	840	J/(kgK)
	Wärmeleitfähigkeit	0,76	0,76	0,76	W/(mK)
	Absorption	0,43	0,43	0,43	-
Seitenscheiben	Emission	0,89	0,89	0,89	-
	Transmission	0,5	0,5	0,5	-
	Anstellwinkel	72,4	72	82,49	°
	Fläche	0,6952	1,15	0,986	m ²
	Masse	5,21	8,63	7,4	kg
	Stärke	0,003	0,003	0,003	m
	Dichte	2500	2500	2500	kg/m ³
	Spez. Wärmekapazität	840	840	840	J/(kgK)
	Wärmeleitfähigkeit	0,76	0,76	0,76	W/(mK)
	Absorption	0,43	0,43	0,43	-
Seitenscheiben	Emission	0,89	0,89	0,89	-
	Transmission	0,5	0,5	0,5	-
	Fläche	3	5	6	m ²
	Fläche	3	5	6	m ²

Anhang 7 Statische Validierung des BEV/REEV-Batteriemodells mit Kühlmittelmassenstrom

Bedingungen	Umgebungstemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmitteltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Zelltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmittelmassenstrom	12	12	12	12	12	12	l/min
Lastprofil	Entladungsrate C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Entladedauer	Simulierte Daten	6300	6300	6300	6300	6300	6300	s
	Validierte Daten	6300	6300	6300	6300	6300	6300	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Entladezustand	Simulierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Zelltemperatur	Simulierte Daten	-13,1	-4,9	3,9	13,3	22,6	31,9	°C
	Validierte Daten	-6,8	-1,6	4,9	12,9	21,9	31,3	°C
	Abweichung	-6,3	-3,4	-1,0	0,4	0,7	0,6	K
Kühlmitteltemperatur	Simulierte Daten	-17,5	-8,1	1,4	11,2	21,0	30,7	°C
	Validierte Daten	-16,1	-7,5	1,4	10,8	20,5	30,4	°C
	Abweichung	-1,4	-0,6	0,0	0,4	0,4	0,3	K
Lastprofil	Entladungsrate C	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-
Entladedauer	Simulierte Daten	3150	3150	3150	3150	3150	3150	s
	Validierte Daten	3150	3150	3150	3150	3150	3150	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Entladezustand	Simulierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Zelltemperatur	Simulierte Daten	-3,1	3,0	11,3	19,8	27,9	36,1	°C
	Validierte Daten	2,6	6,4	11,3	18,0	25,7	34,4	°C
	Abweichung	-5,7	-3,3	0,0	1,8	2,2	1,6	K
Kühlmitteltemperatur	Simulierte Daten	-13,9	-5,3	4,1	13,6	22,9	32,2	°C
	Validierte Daten	-13,4	-5,2	3,3	12,3	21,7	31,3	°C
	Abweichung	-0,5	0,0	0,8	1,3	1,3	0,9	K
Lastprofil	Entladungsrate C	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-
Entladedauer	Simulierte Daten	1575	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Validierte Daten	1575	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Entladezustand	Simulierte Daten	35,4	20,6	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	35,4	20,6	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Zelltemperatur	Simulierte Daten	6,0	17,7	24,8	31,5	37,5	43,4	°C
	Validierte Daten	21,7	25,4	27,2	30,6	35,9	43,0	°C
	Abweichung	-15,7	-7,7	-2,4	0,9	1,6	0,4	K
Kühlmitteltemperatur	Simulierte Daten	-10,7	0,1	9,0	17,9	26,4	34,9	°C
	Validierte Daten	-8,0	0,3	7,8	15,9	24,6	33,7	°C
	Abweichung	-2,7	-0,2	1,2	2,0	1,8	1,2	K

Anhang 8 Statische Validierung des BEV/REEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelmassenstrom

Beding- ungen	Umgebungstemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmitteltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Zelltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmittelmassenstrom	0	0	0	0	0	0	l/min
Lastprofil	Entladungsrate C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Ent- ladedauer	Simulierte Daten	6300	6302	6300	6300	6300	6300	s
	Validierte Daten	6300	6300	6300	6300	6300	6300	s
	Abweichung	0	2	0	0	0	0	s
Ent- ladezustand	Simulierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Zell- temperatur	Simulierte Daten	-2,6	3,3	10,8	19,2	27,1	35,2	°C
	Validierte Daten	2,4	5,1	9,6	16,1	24,2	33,1	°C
	Abweichung	-5,0	-1,8	1,2	3,0	2,9	2,1	K
Kühlmittel- temperatur	Simulierte Daten	-5,0	1,3	9,1	17,7	25,8	34,2	°C
	Validierte Daten	0,1	3,5	8,5	15,4	23,7	32,7	°C
	Abweichung	-5,2	-2,1	0,7	2,3	2,2	1,6	K
Lastprofil	Entladungsrate C	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-
Ent- ladedauer	Simulierte Daten	3150	3150	3150	3150	3150	3150	s
	Validierte Daten	3150	3150	3150	3150	3150	3150	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezustand	Simulierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Zell- temperatur	Simulierte Daten	9,3	14,3	20,9	28,0	34,3	40,7	°C
	Validierte Daten	11,7	13,9	17,5	22,7	29,7	37,7	°C
	Abweichung	-2,4	0,4	3,4	5,3	4,6	3,1	K
Kühlmittel- temperatur	Simulierte Daten	5,2	10,7	17,5	25,0	31,7	38,7	°C
	Validierte Daten	7,7	10,7	14,9	20,8	28,2	36,5	°C
	Abweichung	-2,5	0,0	2,6	4,2	3,5	2,2	K
Lastprofil	Entladungsrate C	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-
Ent- ladedauer	Simulierte Daten	1575	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Validierte Daten	1575	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezustand	Simulierte Daten	33,9	20,5	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	33,9	20,5	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Zell- temperatur	Simulierte Daten	16,5	29,2	34,3	39,5	43,6	48,3	°C
	Validierte Daten	19,0	33,5	34,9	36,8	40,8	47,0	°C
	Abweichung	-2,5	-4,3	-0,6	2,7	2,8	1,3	K
Kühlmittel- temperatur	Simulierte Daten	10,9	23,0	28,6	34,4	39,3	44,8	°C
	Validierte Daten	19,0	26,6	28,9	31,7	36,4	43,1	°C
	Abweichung	-8,1	-3,6	-0,3	2,7	2,9	1,7	K

Anhang 9 Statische Validierung des PHEV-Batteriemodells mit Kühlmittelmassenstrom

Bedingungen	Umgebungstemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmitteltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Zelltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmittelmassenstrom	4	4	4	4	4	4	l/min
Lastprofil	Entladungsrate C	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-
Entladedauer	Simulierte Daten	3150	3150	3150	3150	3150	3150	s
	Validierte Daten	3150	3150	3150	3150	3150	3150	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Entladezustand	Simulierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Zelltemperatur	Simulierte Daten	-5,5	-0,3	7,2	16,6	25,2	34,1	°C
	Validierte Daten	-4,0	0,5	7,9	16,5	24,9	33,8	°C
	Abweichung	-1,5	-0,9	-0,6	0,2	0,2	0,3	K
Kühlmitteltemperatur	Simulierte Daten	-18,5	-9,0	0,8	10,7	20,6	30,4	°C
	Validierte Daten	-18,2	-8,8	0,9	10,7	20,6	30,4	°C
	Abweichung	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	K
Lastprofil	Entladungsrate C	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-
Entladedauer	Simulierte Daten	1575	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Validierte Daten	1575	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Entladezustand	Simulierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Zelltemperatur	Simulierte Daten	1,3	5,9	13,0	22,5	31,8	40,6	°C
	Validierte Daten	7,1	11,8	17,4	23,5	30,5	38,1	°C
	Abweichung	-5,8	-5,9	-4,3	-1,0	1,3	2,6	K
Kühlmitteltemperatur	Simulierte Daten	-17,8	-8,4	1,4	11,3	21,3	31,1	°C
	Validierte Daten	-17,0	-7,6	1,9	11,5	21,2	30,9	°C
	Abweichung	-0,9	-0,8	-0,6	-0,2	0,1	0,2	K
Lastprofil	Entladungsrate C	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	-
Entladedauer	Simulierte Daten	638	638	638	638	638	638	s
	Validierte Daten	638	638	638	638	638	638	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Entladezustand	Simulierte Daten	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	24,0	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	24,0	-
	Abweichung	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	-
Zelltemperatur	Simulierte Daten	21,8	23,7	27,2	33,4	40,6	47,7	°C
	Validierte Daten	26,4	28,6	31,7	36,5	43,2	49,6	°C
	Abweichung	-4,6	-4,8	-4,5	-3,0	-2,6	-1,9	K
Kühlmitteltemperatur	Simulierte Daten	-15,8	-6,5	2,8	12,5	22,2	31,9	°C
	Validierte Daten	-14,9	-5,7	3,5	12,9	22,5	32,3	°C
	Abweichung	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3	-0,4	K

Anhang 10 Statische Validierung des PHEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelmassenstrom

Beding- ungen	Umgebungstemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmitteltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Zelltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmittelmassenstrom	0	0	0	0	0	0	l/min
Lastprofil	Entladungsrate C	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-
Ent- ladedauer	Simulierte Daten	3150	3150	3150	3150	3150	3150	s
	Validierte Daten	3150	3150	3150	3150	3150	3150	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezustand	Simulierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Zell- temperatur	Simulierte Daten	-2,2	2,5	9,6	18,9	26,9	35,6	°C
	Validierte Daten	0,9	4,5	10,8	18,7	26,7	35,3	°C
	Abweichung	-3,2	-2,1	-1,2	0,2	0,2	0,3	K
Kühlmittel- temperatur	Simulierte Daten	-8,4	-1,8	6,3	15,9	24,6	33,7	°C
	Validierte Daten	-4,1	0,6	7,5	16,1	24,7	33,7	°C
	Abweichung	-4,2	-2,5	-1,3	-0,2	-0,2	0,0	K
Lastprofil	Entladungsrate C	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-
Ent- ladedauer	Simulierte Daten	1575	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Validierte Daten	1575	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezustand	Simulierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-
	Abweichung	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Zell- temperatur	Simulierte Daten	4,7	8,9	15,1	24,5	33,8	42,5	°C
	Validierte Daten	12,0	15,2	19,8	25,5	32,1	39,3	°C
	Abweichung	-7,3	-6,3	-4,7	-0,9	1,8	3,2	K
Kühlmittel- temperatur	Simulierte Daten	-3,9	2,3	9,8	19,5	29,1	38,2	°C
	Validierte Daten	1,3	6,1	12,3	19,7	27,5	35,8	°C
	Abweichung	-5,2	-3,8	-2,5	-0,2	1,5	2,4	K
Lastprofil	Entladungsrate C	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	-
Ent- ladedauer	Simulierte Daten	638	651	638	638	638	638	s
	Validierte Daten	638	638	638	638	638	638	s
	Abweichung	0	13	0	0	0	0	s
Ent- ladezustand	Simulierte Daten	20,1	20,1	20,1	20,1	20,1	24,3	-
	Validierte Daten	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	24,2	-
	Abweichung	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	-
Zell- temperatur	Simulierte Daten	24,4	25,3	28,8	34,9	42,0	48,9	°C
	Validierte Daten	28,5	30,4	33,2	37,8	44,4	50,5	°C
	Abweichung	-4,1	-5,1	-4,4	-2,9	-2,4	-1,6	K
Kühlmittel- temperatur	Simulierte Daten	8,8	13,3	18,6	26,0	34,2	42,4	°C
	Validierte Daten	4,8	9,9	15,7	22,6	30,7	40,0	°C
	Abweichung	3,9	3,4	2,9	3,4	3,5	2,4	K

Anhang 11 Statische Validierung des HEV-Batteriemodells mit Kühlmittelvolumenstrom

Bedingungen	Umgebungstemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmitteltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Zelltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmittelmassenstrom	3	3	3	3	3	3	l/min
Lastprofil	Entladungsrate C	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-
Entladedauer	Simulierte Daten	1623	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Validierte Daten	1623	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Entladezustand	Simulierte Daten	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	-
	Validierte Daten	19,96	19,96	19,96	19,96	19,96	19,96	-
	Abweichung	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-
Zelltemperatur	Simulierte Daten	-3,5	0,9	7,0	14,8	23,3	32,8	°C
	Validierte Daten	0,7	6,2	12,6	19,4	27,5	36,4	°C
	Abweichung	-4,3	-5,3	-5,5	-4,6	-4,2	-3,6	K
Kühlmitteltemperatur	Simulierte Daten	-19,8	-9,9	0,1	10,1	20,0	30,0	°C
	Validierte Daten	-19,8	-9,8	0,1	10,1	20,1	30,1	°C
	Abweichung	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	K
Lastprofil	Entladungsrate C	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	-
Entladedauer	Simulierte Daten	1165	705	630	630	630	630	s
	Validierte Daten	1165	705	630	630	630	630	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Entladezustand	Simulierte Daten	20,12	20,08	20,03	20,03	20,03	20,03	-
	Validierte Daten	19,97	19,93	19,89	19,89	19,89	19,89	-
	Abweichung	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	-
Zelltemperatur	Simulierte Daten	3,2	12,4	18,3	23,8	30,9	40,4	°C
	Validierte Daten	7,9	18,6	24,8	30,1	36,6	44,8	°C
	Abweichung	-4,7	-6,2	-6,5	-6,3	-5,7	-4,4	K
Kühlmitteltemperatur	Simulierte Daten	-19,7	-9,8	0,2	10,2	20,1	30,1	°C
	Validierte Daten	-19,7	-9,7	0,3	10,2	20,2	30,2	°C
	Abweichung	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	K
Lastprofil	Entladungsrate C	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	-
Entladedauer	Simulierte Daten	1164	702	578	470	419	513	s
	Validierte Daten	1164	702	578	470	419	513	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Entladezustand	Simulierte Daten	20,06	20,03	20,11	20,05	20,10	20,06	-
	Validierte Daten	19,95	19,92	19,93	19,87	19,94	19,98	-
	Abweichung	0,11	0,11	0,18	0,18	0,15	0,08	-
Zelltemperatur	Simulierte Daten	3,2	12,5	19,4	27,5	36,7	44,1	°C
	Validierte Daten	7,9	18,7	26,0	34,6	43,3	49,0	°C
	Abweichung	-4,7	-6,2	-6,6	-7,1	-6,5	-4,9	K
Kühlmitteltemperatur	Simulierte Daten	-19,7	-9,7	0,2	10,2	20,2	30,2	°C
	Validierte Daten	-19,7	-9,7	0,3	10,3	20,2	30,2	°C
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	K

Anhang 12 Statische Validierung des HEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelvolumenstrom

Beding- ungen	Umgebungstemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmitteltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Zelltemperatur	-20	-10	0	10	20	30	°C
	Kühlmittelmassenstrom	3	3	3	3	3	3	l/min
Lastprofil	Entladungsrate C	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	-
Ent- ladedauer	Simulierte Daten	1623	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Validierte Daten	1623	1575	1575	1575	1575	1575	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezustand	Simulierte Daten	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	-
	Validierte Daten	19,96	19,96	19,96	19,96	19,96	19,96	-
	Abweichung	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-
Zell- temperatur	Simulierte Daten	-3,5	0,9	7,0	14,8	23,3	32,8	°C
	Validierte Daten	0,7	6,2	12,6	19,4	27,5	36,4	°C
	Abweichung	-4,3	-5,3	-5,5	-4,6	-4,2	-3,6	K
Kühlmittel- temperatur	Simulierte Daten	-19,8	-9,9	0,1	10,1	20,0	30,0	°C
	Validierte Daten	-19,8	-9,8	0,1	10,1	20,1	30,1	°C
	Abweichung	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	K
Lastprofil	Entladungsrate C	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	-
Ent- ladedauer	Simulierte Daten	1165	705	630	630	630	630	s
	Validierte Daten	1165	705	630	630	630	630	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezustand	Simulierte Daten	20,12	20,08	20,03	20,03	20,03	20,03	-
	Validierte Daten	19,97	19,93	19,89	19,89	19,89	19,89	-
	Abweichung	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	-
Zell- temperatur	Simulierte Daten	3,2	12,4	18,3	23,8	30,9	40,4	°C
	Validierte Daten	7,9	18,6	24,8	30,1	36,6	44,8	°C
	Abweichung	-4,7	-6,2	-6,5	-6,3	-5,7	-4,4	K
Kühlmittel- temperatur	Simulierte Daten	-19,7	-9,8	0,2	10,2	20,1	30,1	°C
	Validierte Daten	-19,7	-9,7	0,3	10,2	20,2	30,2	°C
	Abweichung	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	K
Lastprofil	Entladungsrate C	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	-
Ent- ladedauer	Simulierte Daten	1164	702	578	470	419	513	s
	Validierte Daten	1164	702	578	470	419	513	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezustand	Simulierte Daten	20,06	20,03	20,11	20,05	20,10	20,06	-
	Validierte Daten	19,95	19,92	19,93	19,87	19,94	19,98	-
	Abweichung	0,11	0,11	0,18	0,18	0,15	0,08	-
Zell- temperatur	Simulierte Daten	3,2	12,5	19,4	27,5	36,7	44,1	°C
	Validierte Daten	7,9	18,7	26,0	34,6	43,3	49,0	°C
	Abweichung	-4,7	-6,2	-6,6	-7,1	-6,5	-4,9	K
Kühlmittel- temperatur	Simulierte Daten	-19,7	-9,7	0,2	10,2	20,2	30,2	°C
	Validierte Daten	-19,7	-9,7	0,3	10,3	20,2	30,2	°C
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,0	K

Anhang 13 Transiente Validierung des BEV/REEV-Batteriemodells mit Kühlmittelmassenstrom

Beding- ungen	Umgebungstemperatur	-10	0	10	20	-10	0	10	20	-10	0	10	20	°C
	Kühlmitteltemperatur	-10	0	10	20	-10	0	10	20	-10	0	10	20	°C
	Zelltemperatur	-10	0	10	20	-10	0	10	20	-10	0	10	20	°C
	Kühlmittelmassenstrom	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	l/min
Lastprofil	Entladungsprofil	IO	IO	IO	IO	AO	AO	AO	AO	AB	AB	AB	AB	-
Ent- lade- dauer	Simulierte Daten	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	2800	2800	2800	2800	s
	Validierte Daten	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	2800	2800	2800	2800	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezu- stand	Simulierte Daten	82,6	82,6	82,5	82,5	74,2	74,2	74,2	74,2	59,0	59,0	59,0	59,0	-
	Validierte Daten	82,6	82,6	82,6	82,6	74,2	74,2	74,2	74,2	59,0	59,0	59,0	59,0	-
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Zell- tempera- tur	Simulierte Daten	-9,4	0,3	10,2	20,2	-8,1	1,1	10,8	20,6	-4,0	4,3	13,6	22,7	°C
	Validierte Daten	-9,4	0,3	10,2	20,1	-8,0	1,1	10,6	20,5	-3,3	4,1	12,6	22,0	°C
	Abweichung	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	-0,8	0,1	1,0	0,7	K
Kühl- mittel- tempera- tur	Simulierte Daten	-9,8	0,1	10,1	20,1	-9,3	0,4	10,3	20,2	-7,8	1,6	11,4	21,0	°C
	Validierte Daten	-9,8	0,1	10,0	20,0	-9,4	0,3	10,2	20,1	-8,0	1,2	10,8	20,6	°C
	Abweichung	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,4	K

Anhang 14 Transiente Validierung des BEV/REEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelmassenstrom

Beding- ungen	Umgebungstemperatur	-10	20	-10	20	-10	20	°C
	Kühlmitteltemperatur	-10	20	-10	20	-10	20	°C
	Zelltemperatur	-10	20	-10	20	-10	20	°C
	Kühlmittelmassenstrom	0	0	0	0	0	0	l/min
Lastprofil	Entladungsprofil	IO	IO	AO	AO	AB	AB	-
Ent- lade- dauer	Simulierte Daten	3600	3600	3600	3600	2800	2800	s
	Validierte Daten	3600	3600	3600	3600	2800	2800	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezu- stand	Simulierte Daten	82,6	82,5	74,2	74,2	59,0	59,0	-
	Validierte Daten	82,6	82,6	74,2	74,2	59,0	59,0	-
	Abweichung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Zell- tempera- tur	Simulierte Daten	-8,7	20,3	-6,2	21,2	0,2	24,8	°C
	Validierte Daten	-8,9	20,2	-6,4	20,9	0,6	23,3	°C
	Abweichung	0,2	0,1	0,2	0,4	-0,3	1,5	K
Kühl- mittel- tempera- tur	Simulierte Daten	-8,9	20,3	-6,8	21,0	-1,3	24,1	°C
	Validierte Daten	-9,0	20,2	-6,8	20,7	-0,9	22,8	°C
	Abweichung	0,1	0,1	0,1	0,3	-0,5	1,3	K

Anhang 15 Transiente Validierung des PHEV-Batteriemodells mit Kühlmittelmassenstrom

Beding- ungen	Umgebungstemperatur	-10	0	10	20	-10	0	10	20	-10	0	10	20	°C
	Kühlmitteltemperatur	-10	0	10	20	-10	0	10	20	-10	0	10	20	°C
	Zelltemperatur	-10	0	10	20	-10	0	10	20	-10	0	10	20	°C
	Kühlmittelmassenstrom	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	l/min
Lastprofil	Entladungsprofil	IO	IO	IO	IO	AO	AO	AO	AO	AB	AB	AB	AB	-
Ent- lade- dauer	Simulierte Daten	3600	3600	3600	3600	2400	2400	2400	2400	880	880	880	880	s
	Validierte Daten	3600	3600	3600	3600	2400	2400	2400	2400	880	880	880	880	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezu- stand	Simulierte Daten	41,0	42,2	42,4	42,4	21,2	22,0	22,3	22,3	20,2	20,5	20,5	20,5	-
	Validierte Daten	41,0	42,1	42,3	42,3	21,1	21,9	22,3	22,3	20,2	20,5	20,5	20,5	-
	Abweichung	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	-
Zell- tempera- tur	Simulierte Daten	-0,6	6,6	15,6	24,9	8,4	14,9	22,9	31,3	22,9	27,0	33,6	41,0	°C
	Validierte Daten	-0,2	7,2	15,7	24,3	11,4	17,1	23,3	30,4	27,1	30,0	35,0	42,0	°C
	Abweichung	-0,4	-0,6	-0,1	0,6	-3,0	-2,2	-0,4	0,8	-4,1	-3,0	-1,4	-1,0	K
Kühl- mittel- tempera- tur	Simulierte Daten	-9,0	0,7	10,6	20,5	-8,1	1,6	11,4	21,2	-6,6	2,8	12,5	22,2	°C
	Validierte Daten	-8,9	0,8	10,7	20,5	-7,6	2,0	11,5	21,2	-5,9	3,3	12,8	22,4	°C
	Abweichung	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	-0,5	-0,4	-0,2	0,0	-0,7	-0,5	-0,3	-0,2	K

Anhang 16 Transiente Validierung des PHEV-Batteriemodells ohne Kühlmittelmassenstrom

Beding- ungen	Umgebungstemperatur	-10	20	-10	20	-10	20	°C
	Kühlmitteltemperatur	-10	20	-10	20	-10	20	°C
	Zelltemperatur	-10	20	-10	20	-10	20	°C
	Kühlmittelmassenstrom	0	0	0	0	0	0	l/min
Lastprofil	Entladungsprofil	IO	IO	AO	AO	AB	AB	-
Ent- lade- dauer	Simulierte Daten	3600	3600	2400	2400	880	880	s
	Validierte Daten	3600	3600	2400	2400	880	880	s
	Abweichung	0	0	0	0	0	0	s
Ent- ladezu- stand	Simulierte Daten	41,4	42,4	21,4	22,3	20,2	20,5	-
	Validierte Daten	41,3	42,3	21,4	22,3	20,2	20,5	-
	Abweichung	0,04	0,03	0,04	0,03	0,00	0,01	-
Zell- tempera- tur	Simulierte Daten	2,2	26,7	12,6	34,0	25,1	42,5	°C
	Validierte Daten	4,3	26,4	16,9	33,3	28,9	43,4	°C
	Abweichung	-2,1	0,3	-4,3	0,8	-3,8	-0,9	K
Kühl- mittel- tempera- tur	Simulierte Daten	-2,0	24,5	4,8	29,3	12,7	34,6	°C
	Validierte Daten	0,8	24,8	9,3	29,3	9,7	30,3	°C
	Abweichung	-2,8	-0,3	-4,5	-0,1	3,0	4,3	K

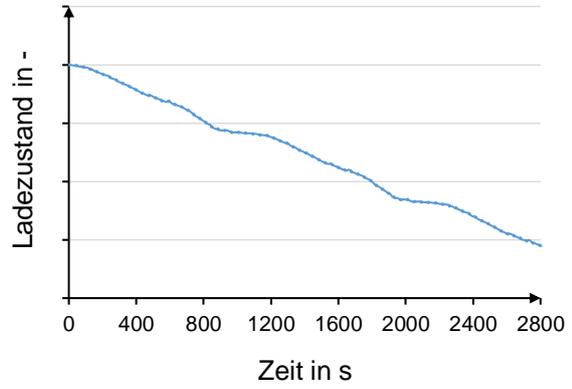
Anhang 17 SOC-Verlauf mit Start-Zelltemperatur von 20 °C a) stationäres und b) transientes Profil

a) Batterievalidierung BEV/REEV
statisches Lastprofil
mit Kühlmittelvolumenstrom



— Validierte Daten Simulierte Daten

b) Batterievalidierung BEV/REEV mit
transientem Stromprofil AB
mit Volumenstrom



— Validierte Daten Simulierte Daten

Anhang 18 Übersicht über die angenommenen Nebenverbraucherleistungen 2015, Leistungen definiert und aus [48], [202]

Fahrzeugklasse	Segment 1	Segment 2	Segment 3	Einheit
Tagfahrlicht	38	47	47	W
Abblendlicht	141	142	142	
Bremslicht	42	42	42	
Motorelektronik	150	150	150	
Heckscheibenheizung	141	142	142	
Radio	12	12	12	
Lenk- und Bremsunterstützung	120	120	120	

Anhang 19 Übersicht über die angenommenen Nebenverbraucherleistungen 2025, Leistungen definiert und aus [48], [202]

Fahrzeugklasse	Segment 1	Segment 2	Segment 3	Einheit
Tagfahrlicht	11	11	11	W
Abblendlicht	30	30	30	
Bremslicht	11	11	11	
Motorelektronik	150	150	150	
Heckscheibenheizung	185	235	381	
Radio	12	12	12	
Lenk- und Bremsunterstützung und sonstige Nebenverbraucher	180	180	180	

Anhang 20 Fahrzeugvarianten Segment 1: Vergleich der Verbrauchsangaben in dem NEFZ, Daten aus [38]

Segment	Fahrzeug	Typbezeichnung	Baujahr	Leistung	Verbrauch
-	-	-	a	kW	kWh/100 km
Segment 1 BEV	Volkswagen e-up!	-	2013	60	11,7
	SEG 1 BEV	Referenzfahrzeug BEV	2015	66	11,9
	Mitsubishi i-MiEV	-	2014	49	12,5
	Peugeot iOn	-	2016	49	12,6
	Citroën C-Zero	-	2013	49	12,6
	smart forfour electric drive	-	2017	60	13,0
	Renault ZOE Life	-	2016	68	13,3
Segment 1 ICE-G-Fahr- zeug	Volkswagen up!	1,0L 55kW M5 3T	2015	55	39,6
	Volkswagen Polo	1,2L 66kW M5 3T	2014	66	42,0
	Renault Clio	0,9L 66kW M5 5T	2016	66	42,0
	SEG 1 ICE-G-Fahrzeug	Referenzfahrzeug ICE-B-Fahrzeug	2015	60	42,4
	Fiat 500	1,2L 51kW M5 3T	2015	51	44,2
	Ford Fiesta	1,25L 60kW M5 3T	2015	60	46,5
Segment 1 ICE-D-Fahr- zeug	Opel Corsa	1,3L 70kW M5 3T	2014	70	31,9
	Ford Fiesta	1,5L 70kW M5 3T	2015	70	33,9
	Renault Clio	1,5L 66kW M5 5T	2016	66	34,6
	Volkswagen Polo	1,4L 66kW M5 3T	2014	66	35,4
	SEG 1 ICE-D-Fahrzeug	Referenzfahrzeug ICE-D-Fahrzeug	2015	60	39,8
	Fiat Panda	1,3L 55kW M5 5T	2012	55	42,8

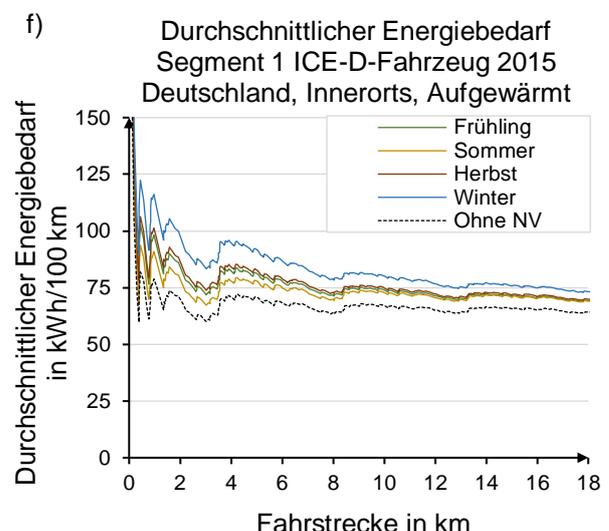
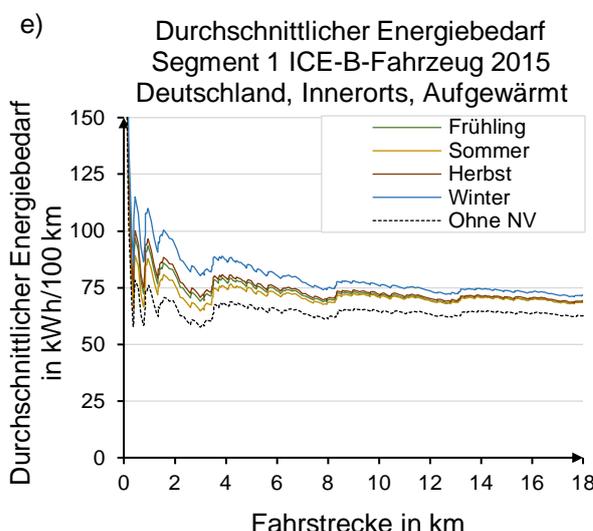
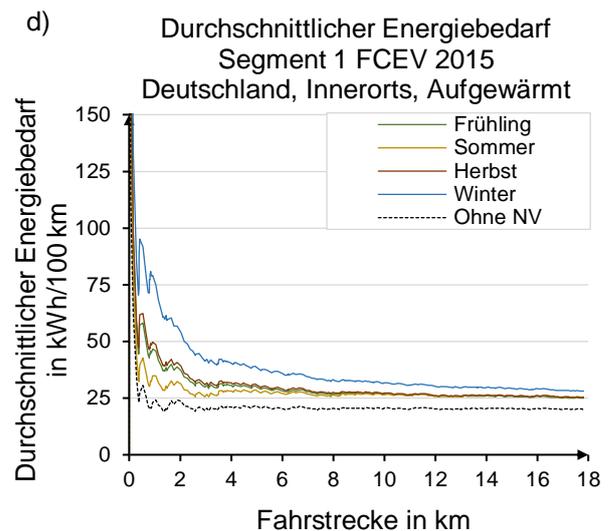
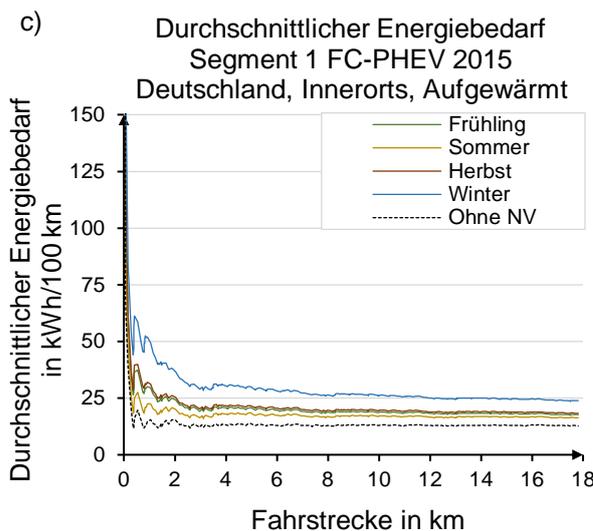
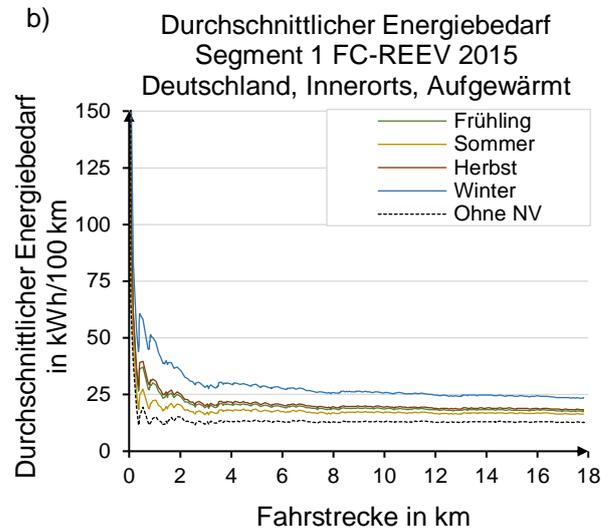
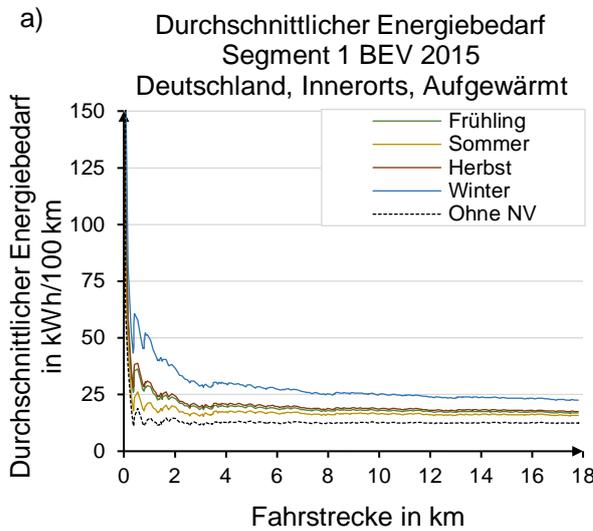
Anhang 21 Fahrzeugvarianten Segment 2: Vergleich der Verbrauchsangaben in dem NEFZ, Daten aus [38]

Segment	Fahrzeug	Typbezeichnung	Baujahr	Leistung	Verbrauch
-	-	-	a	kW	kWh/100 km
Segment 2 BEV	Volkswagen e-Golf	-	2014	85	12,7
	BMW i3 (94 Ah)	-	2016	125	12,8
	SEG 2 BEV	Referenzfahrzeug BEV	2015	92	13,8
	Nissan Leaf Visia 30 kWh	-	2015	80	15,0
Segment 2 FCEV	Toyota Mirai	-	2014	114	22,3
	SEG 2 FCEV	Referenzfahrzeug FCEV	2015	138	22,7
	Hyundai ix35 Fuel Cell	-	2014	100	31,7
	Daimler B-Klasse F-CELL	-	2009	100	32,3
Segment 2 ICE-B-Fahr- zeug	Ford Focus	1,0L 92kW M6 5T	2014	92	42,5
	Citroën C4 Picasso	1,2L 96kW M6 5T	2015	96	44,7
	Volkswagen Golf	1,4L 92kW M6 5T	2014	92	47,4
	SEG 2 ICE-G-Fahrzeug	Referenzfahrzeug ICE-B-Fahrzeug	2015	100	48,2
	Mercedes-Benz C-Klasse	1,6L 115KW M6 5T	2015	115	48,3
	Nissan Qashqai	1,6L120kW M6 5T	2015	120	51,8
Segment 2 ICE-D-Fahr- zeug	Ford Focus	1,6L 85kW M6 5T	2011	85	41,8
	Volkswagen Golf	1,6L 81kW M6 5T	2014	81	42,2
	Mercedes-Benz C-Klasse	2,2L 120KW M6 5T	2015	120	42,8
	Nissan Qashqai	1,6L 96kW M6 5T	2015	96	43,8
	SEG 2 ICE-D-Fahrzeug	Referenzfahrzeug ICE-D-Fahrzeug	2015	100	46,2
	Citroën C4 Picasso	1,6L 88kW M6 5T	2014	88	49,8

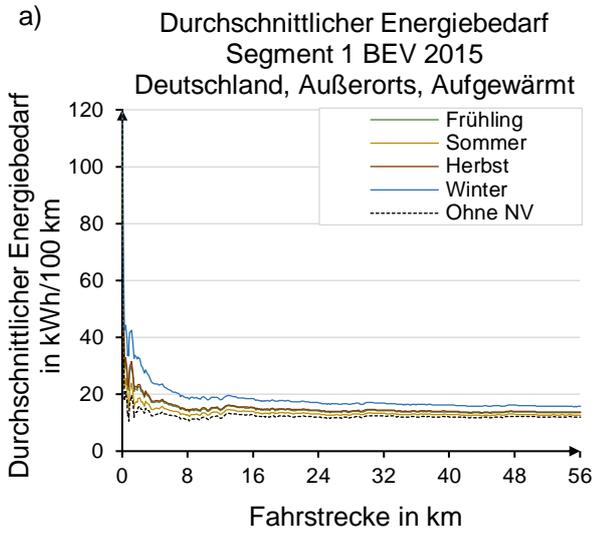
Anhang 22 Fahrzeugvarianten Segment 3: Vergleich der Verbrauchsangaben in dem NEFZ, Daten aus [38]

Segment	Fahrzeug	Typbezeichnung	Baujahr	Leistung	Verbrauch
-	-	-	a	kW	kWh/100 km
Segment 3 BEV	SEG 3 BEV	Referenzfahrzeug BEV	2015	183	16,2
	Tesla Model S 60	-	2013	225	18,1
	Tesla Model S 100D	-	2017	310	18,9
SEG 3 ICE-G-Fahr- zeug	SEG 3 ICE-G-Fahrzeug	Referenzfahrzeug ICE B	2015	180	49,7
	Mercedes-Benz E-Klasse	2,0L155kW A7 5T	2015	155	54,5
	Audi TT	2,0L169kW A6 3T S-tronic	2014		56,8
	BMW 5er	2,0L180kW A8 5T	2013	180	58,5
	BMW 6er	3,0L235kW A8 2T	2015	235	70,5
	BMW 7er	3,0L235kW A8 4T	2012	235	70,6
	Mercedes-Benz S-Klasse	3,0L 245kW A7 4T	2015	245	75,1
	Porsche Panamera	3,6L228kW A7 5T PDK	2013	228	76,9
SEG 3 ICE-D-Fahr- zeug	Audi TT	2,0L135kW M6 3T	2014	135	42,8
	Mercedes-Benz E-Klasse	2,2L150kW A7 5T DPF	2015	150	47,1
	BMW 5er	2,0L160kW A8 5T	2013	160	51,3
	SEG 3 ICE-D-Fahrzeug	Referenzfahrzeug ICE D	2015	180	54,4
	BMW 6er	3,0L230kW A8 2T	2015	230	55,8
	Mercedes-Benz S-Klasse	3,0L 190kW A7 4T	2015	190	56,8
	BMW 7er	3,0L280kW A8 4T	2012	280	63,7
	Porsche Panamera	3,0L221kW A8 5T Tiptronic S	2013	221	63,7

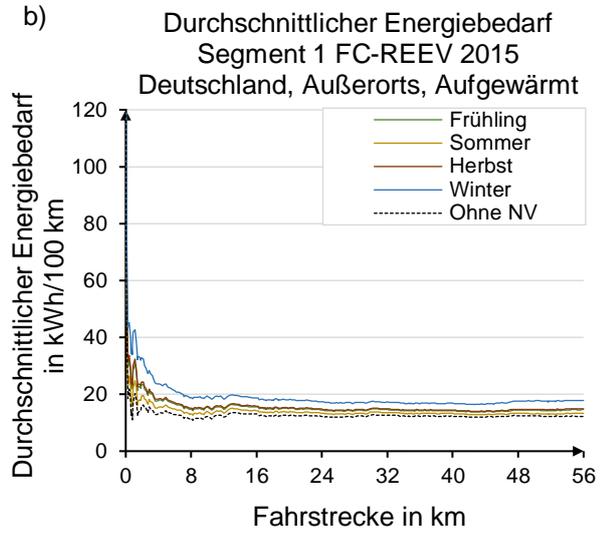
Anhang 23 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des ersten Segments in dem Innerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug



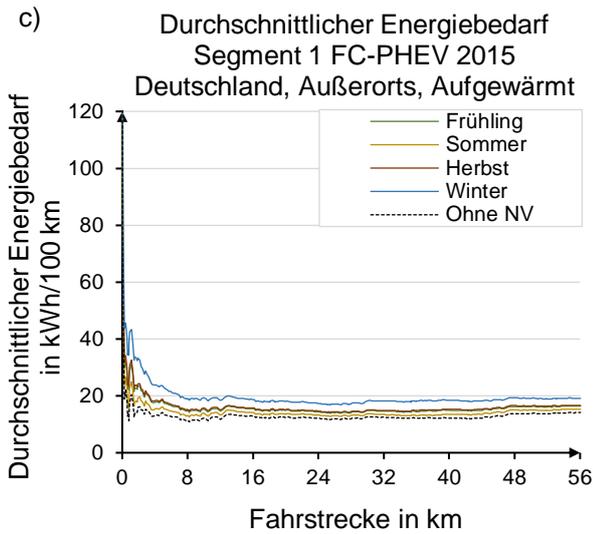
Anhang 24 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des ersten Segments in dem Außerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug



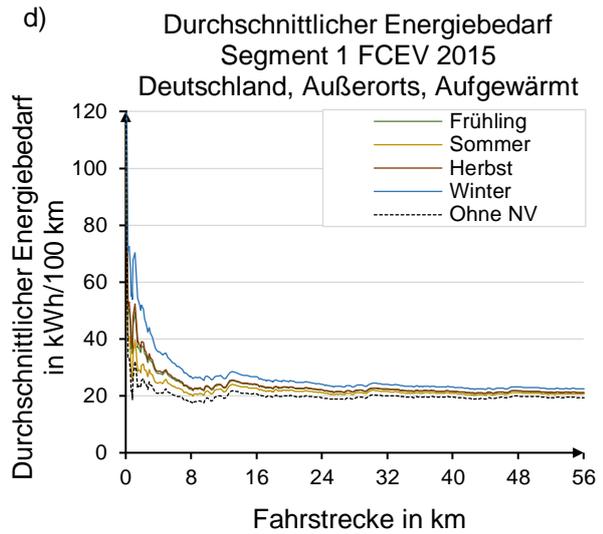
NV: Nebenverbraucher



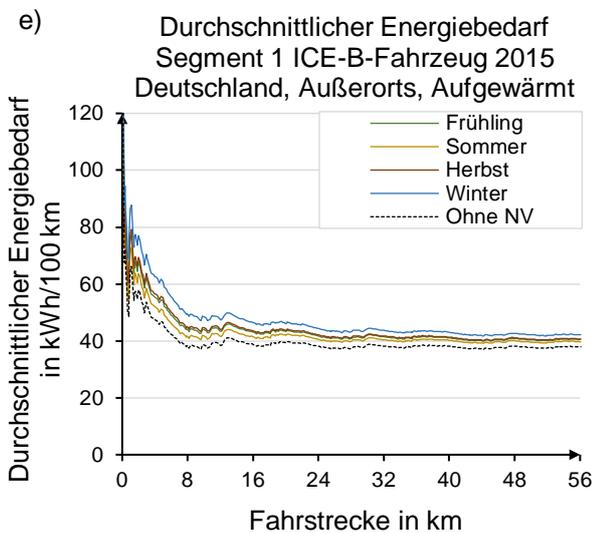
NV: Nebenverbraucher



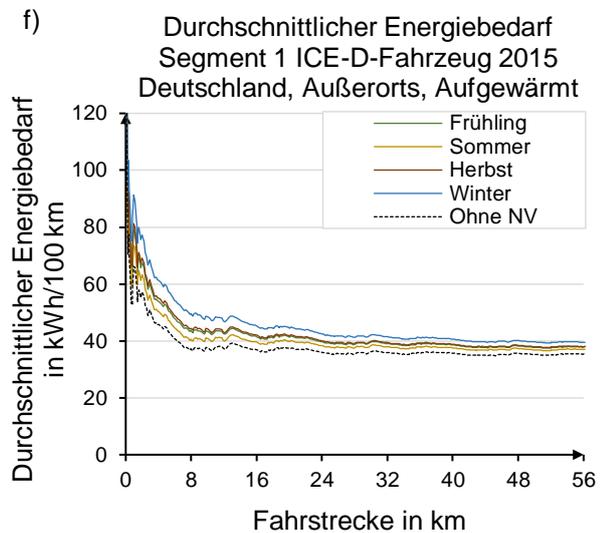
NV: Nebenverbraucher



NV: Nebenverbraucher

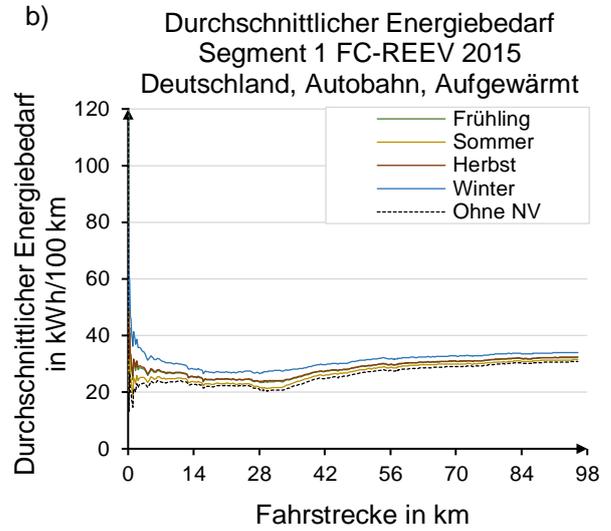
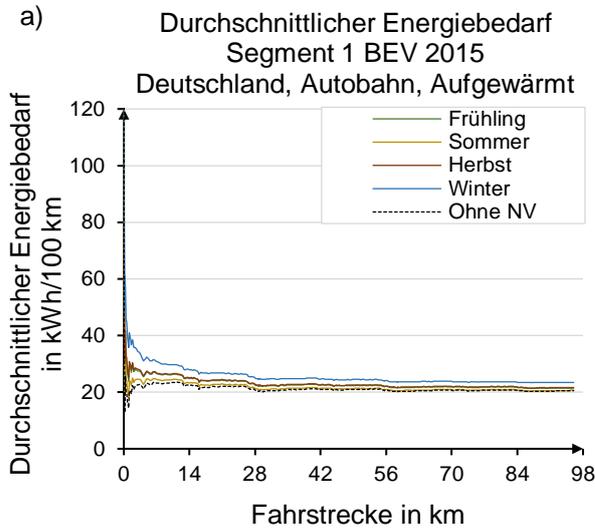


NV: Nebenverbraucher



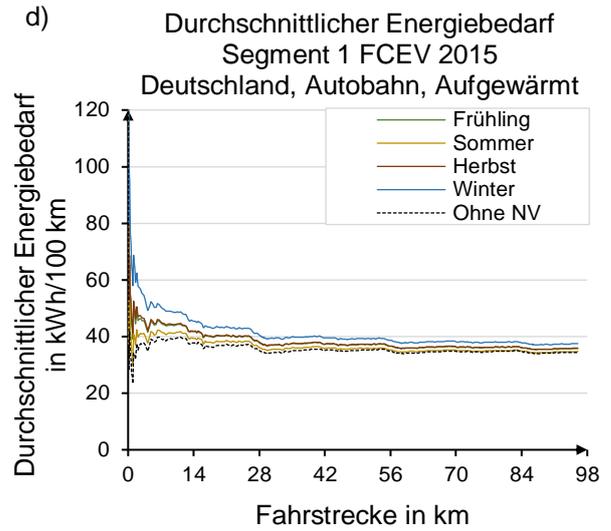
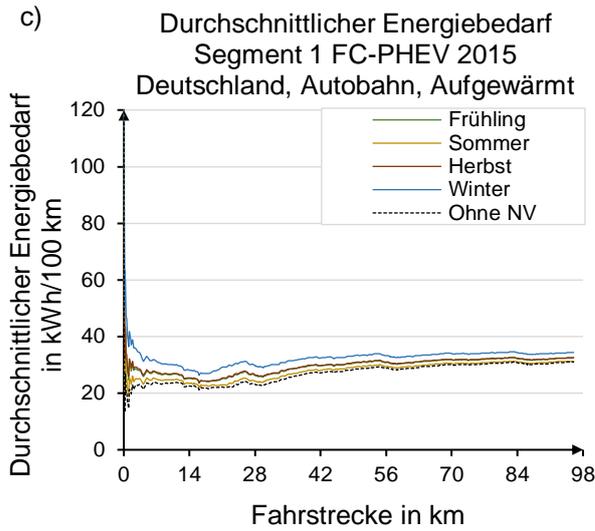
NV: Nebenverbraucher

Anhang 25 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des ersten Segments in dem Autobahnzyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug



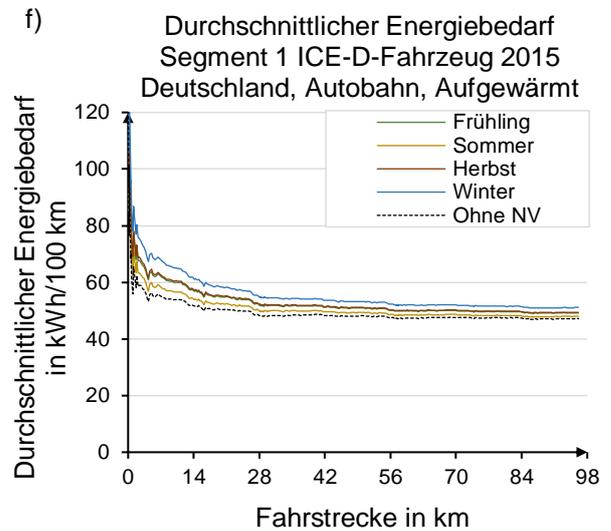
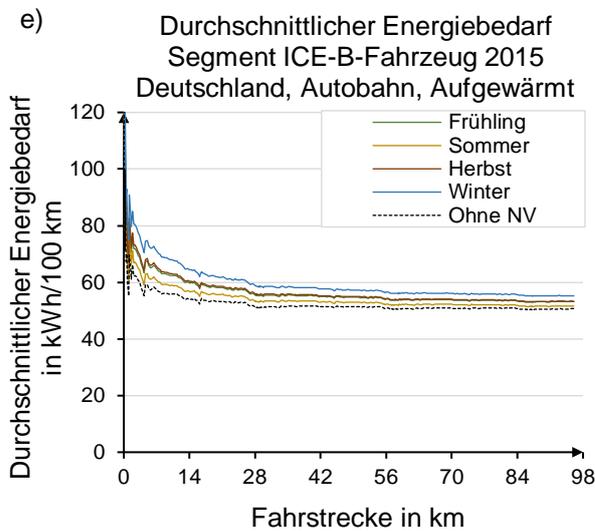
NV: Nebenverbraucher

NV: Nebenverbraucher



NV: Nebenverbraucher

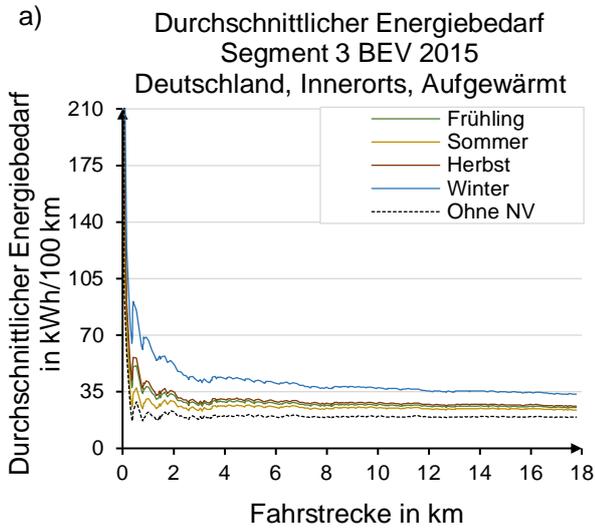
NV: Nebenverbraucher



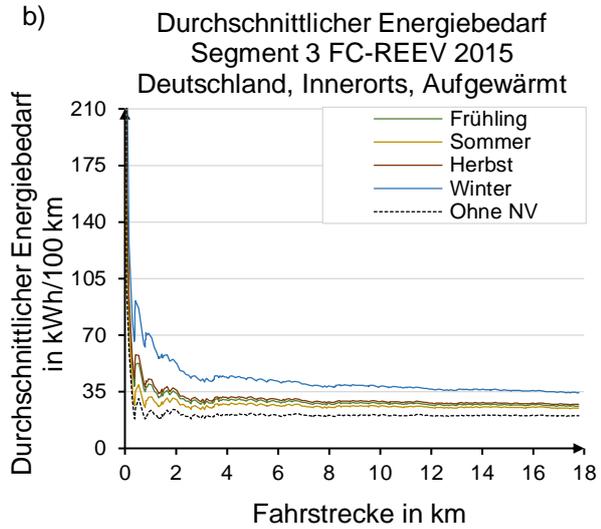
NV: Nebenverbraucher

NV: Nebenverbraucher

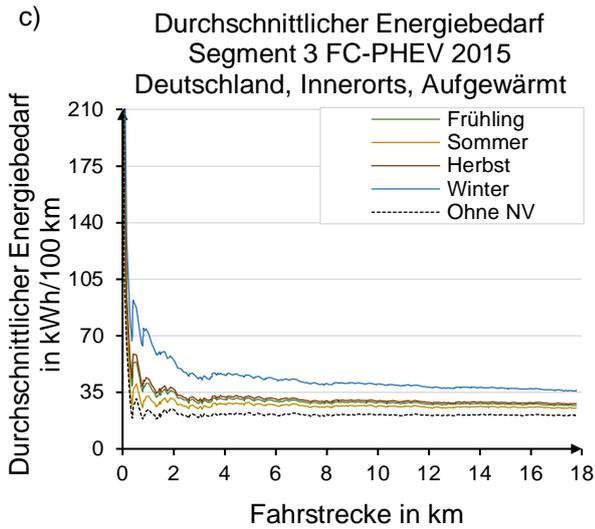
Anhang 26 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des dritten Segments in dem Innerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug



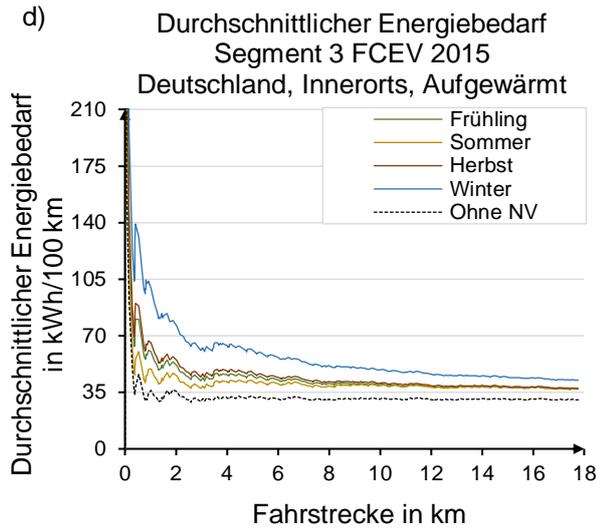
NV: Nebenverbraucher



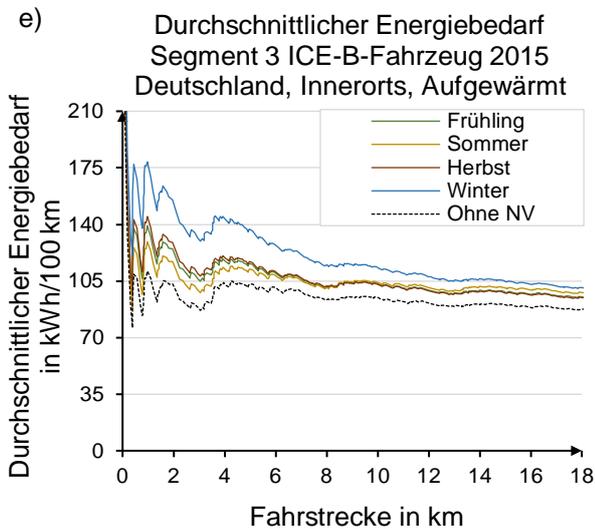
NV: Nebenverbraucher



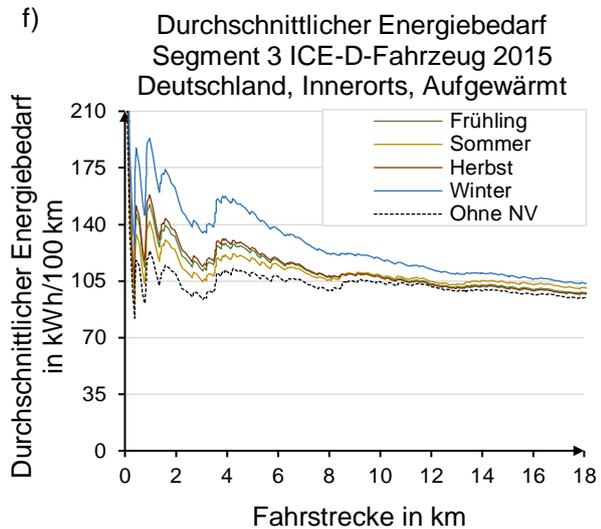
NV: Nebenverbraucher



NV: Nebenverbraucher

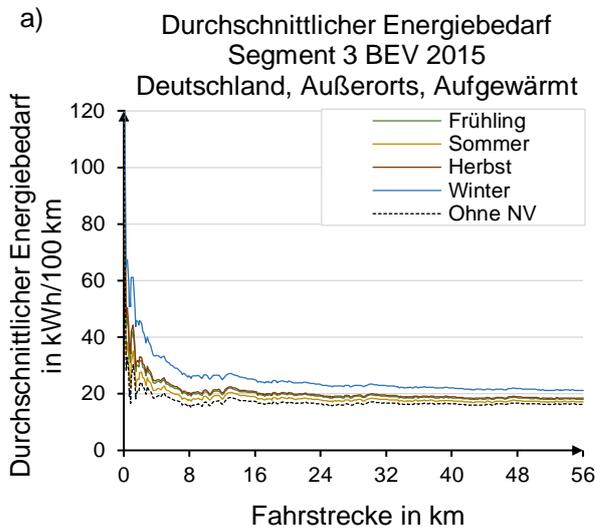


NV: Nebenverbraucher

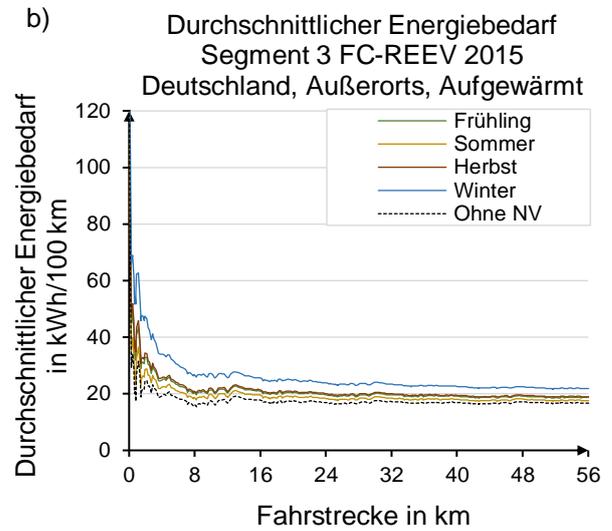


NV: Nebenverbraucher

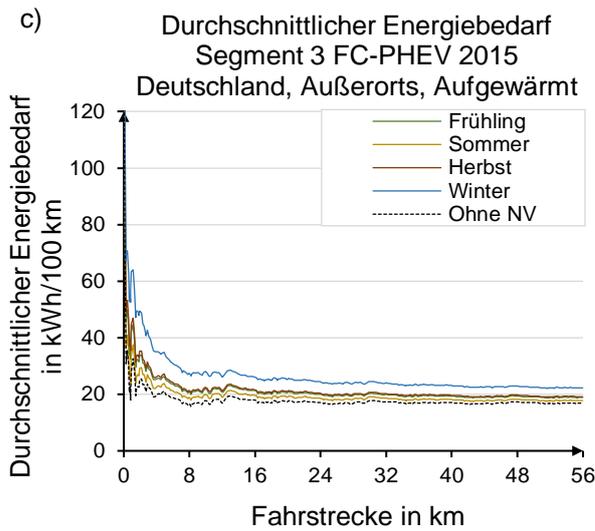
Anhang 27 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des dritten Segments in dem Außerortszyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug



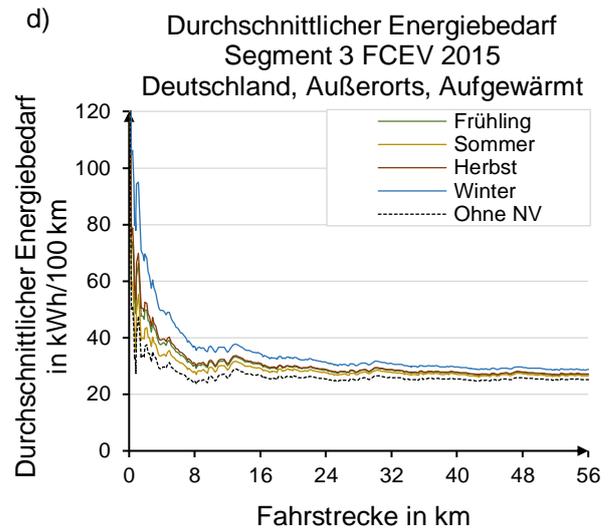
NV: Nebenverbraucher



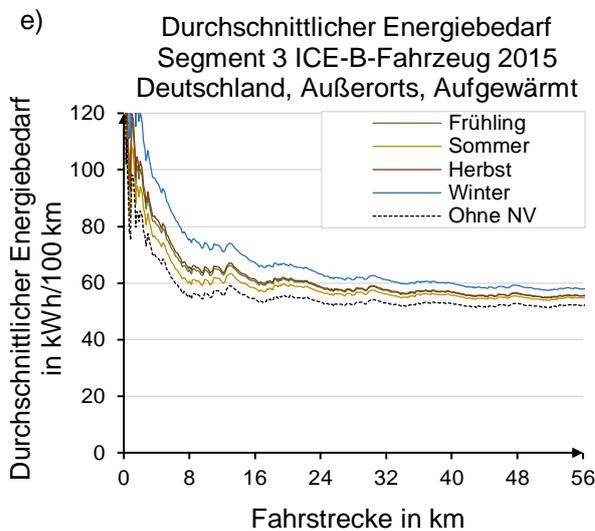
NV: Nebenverbraucher



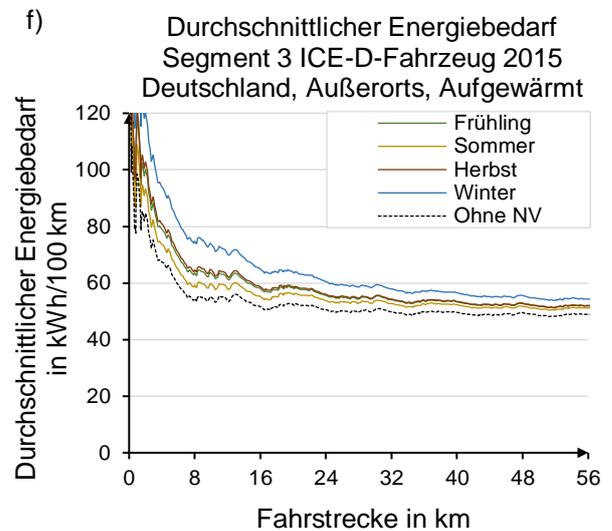
NV: Nebenverbraucher



NV: Nebenverbraucher

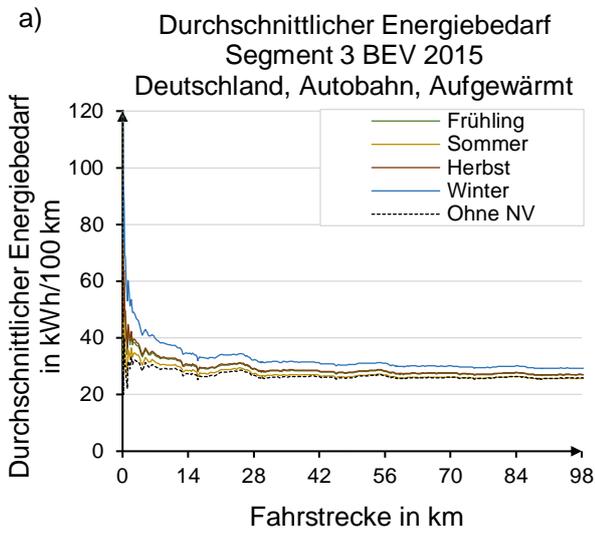


NV: Nebenverbraucher

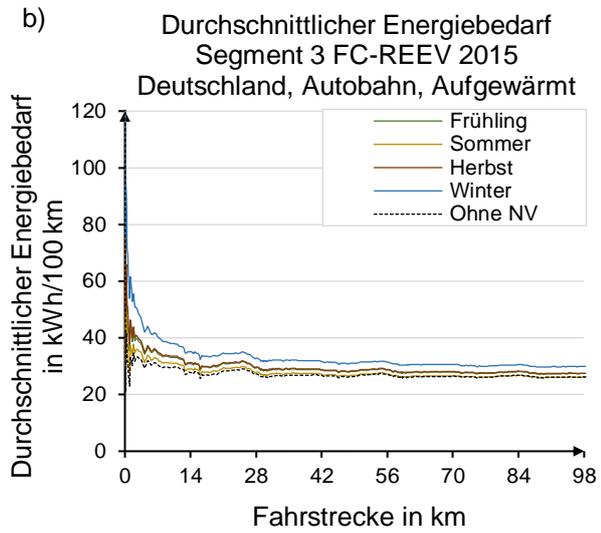


NV: Nebenverbraucher

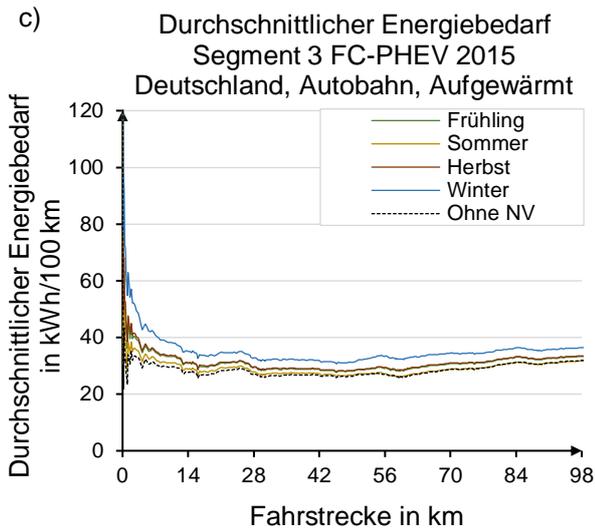
Anhang 28 Vergleich des durchschnittlichen Energiebedarfs über der Fahrstrecke der verschiedenen Antriebsvarianten des dritten Segments in dem Autobahnzyklus unter deutschen Klimabedingungen a) BEV, b) FC-REEV, c) FC-PHEV, d) FCEV, e) ICE-G-Fahrzeug und f) ICE-D-Fahrzeug



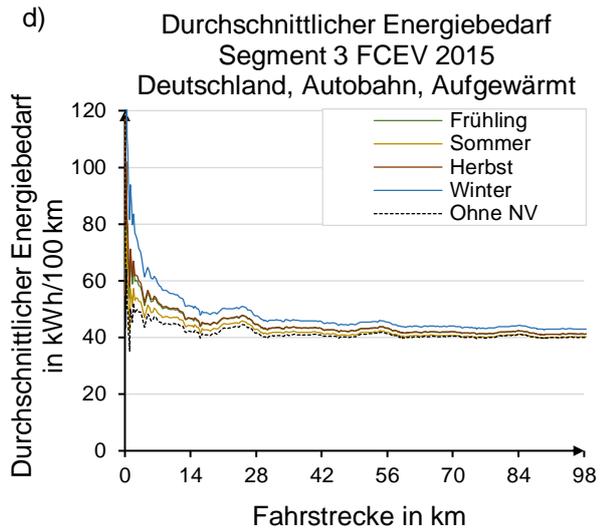
NV: Nebenverbraucher



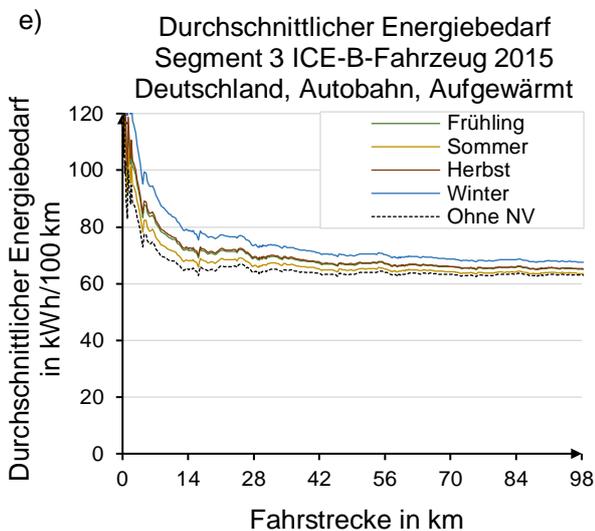
NV: Nebenverbraucher



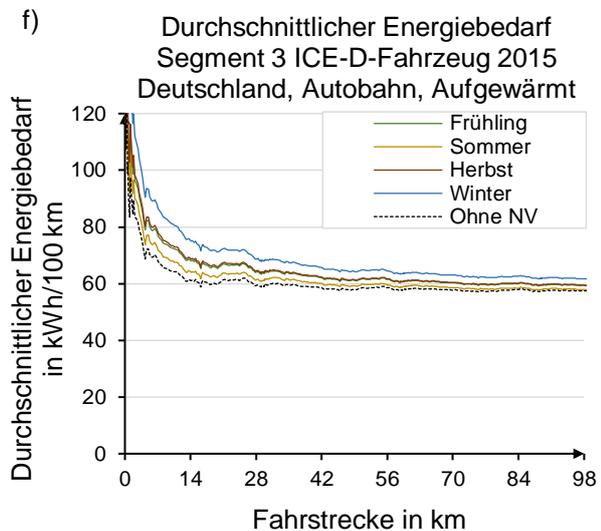
NV: Nebenverbraucher



NV: Nebenverbraucher



NV: Nebenverbraucher



NV: Nebenverbraucher