

TEXTE

160/2022

Abschlussbericht

Energieverbrauch von Elektroautos (BEV)

von:

Hinrich Helms, Bernhard Bruch, Dominik Räder
ifeu, Heidelberg

Stefan Hausberger, Silke Lipp, Claus Matzer

Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme, Graz

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 160/2022

Projektnummer 1711964

FB001036

Abschlussbericht

Energieverbrauch von Elektroautos (BEV)

von

Hinrich Helms, Bernhard Bruch, Dominik Räder
ifeu, Heidelberg


Stefan Hausberger, Silke Lipp, Claus Matzer
Institut für Thermodynamik und nachhaltige
Antriebssysteme, Graz


Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

November 2022

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr
Helge Jahn

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Energieverbrauch von Elektroautos (BEV)

Zentrales Instrument für die Minderung der CO₂-Emissionen von PKW sind die europäischen Flottenzielwerte (Verordnung (EU) 2019/631). Sowohl für PKW mit Verbrennungsmotor als auch für Elektrofahrzeuge wird hier aktuell das WLTP-Testverfahren zur Bestimmung des offiziellen Energieverbrauchs genutzt. Es handelt sich jedoch um einen Test auf dem Rollenprüfstand und die Abbildung des realen Verbrauchsverhaltens bleibt eingeschränkt. Neben den Verbrauchsunterschieden durch unterschiedliche Fahrprofile können auch andere Verbraucher (Nicht-Antriebs-Energie = NAE) zu Abweichungen zwischen WLTP- und Realverbrauch führen. Vor allem werden wichtige Verbraucher wie die Klimaanlage nicht erfasst.

Bei Elektroautos (BEV) kann der Anteil des NAE-Verbrauchs am Gesamtverbrauch tendenziell noch höher liegen als bei Verbrennern. Infolge der hohen Wirkungsgrade von Batterie und Elektromotor entstehen geringere Wärmeverluste, so dass für die Heizung des Fahrgastraumes bei Elektroantrieben zusätzliche Energie aufgewendet werden muss. Darüber hinaus gibt es im Elektrofahrzeug zusätzliche Verbraucher wie z.B. die Temperierung der Batterie. Solche Heizenergiebedarfe sind im Test nicht erfasst. Ladeverluste sind dagegen im Messverfahren zwar enthalten, es handelt sich voraussichtlich jedoch um Idealwerte, da der Hersteller eine optimale Ladestrategie wählen darf.

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel der Studie, den Beitrag des NAE-Verbrauchs zum Gesamtverbrauch von BEV im Realbetrieb darzustellen. Auf dieser Basis werden dann Vorschläge entwickelt, wie das Verfahren des WLTP für die offiziellen Verbrauchsangaben sinnvoll angepasst und erweitert werden kann. Die Vorschläge zielen auf eine realitätsnähere Abbildung der Verbräuche von Elektrofahrzeugen im offiziellen Testverfahren WLTP.

Abstract: Energy consumption of electric cars (BEV)

The central instrument for reducing CO₂ emissions from passenger cars is the European fleet target values (Regulation (EU) 2019/631). For both, passenger cars with combustion engines and electric vehicles, the WLTP test procedure is currently used to determine the official energy consumption. However, this is a test on a chassis dynamometer and the representation of real consumption behaviour remains limited. In addition to the differences in consumption due to different driving profiles, other consumers (non-drive energy = NAE) can also lead to deviations between WLTP and real consumption. Above all, important consumers such as the air conditioning system are not considered.

For electric cars (BEV), the share of NAE consumption in total consumption can tend to be even higher than for internal combustion vehicles. As a result of the high efficiencies of the battery and electric motor, there are lower heat losses, so that additional energy has to be used for heating the passenger compartment in electric drives. Furthermore, there are additional consumers in the electric vehicle, such as the temperature control of the battery. Such heating energy requirements are not considered in the test. Charging losses, on the other hand, are included in the measurement procedure, but these are presumably ideal values, since the manufacturer is allowed to choose an optimal charging strategy.

Against this background, the aim of the study is to show the contribution of NAE consumption to the overall consumption of BEVs in real-world operation. On this basis, proposals are then developed as to how the WLTP procedure can be sensibly adapted and extended for the official consumption data. The proposals aim at a more realistic representation of the consumption of electric vehicles in the official WLTP test procedure.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung.....	11
Summary	16
1 Hintergrund und Ziel der Studie.....	21
2 Reale Energieverbräuche von BEV und Lücke zu offiziellen Angaben nach WLTP.....	22
2.1 Datenquellen zum realen Energieverbrauch von BEV	22
2.1.1 Typprüfdaten	22
2.1.2 Spritmonitor.de.....	23
2.1.3 ADAC Ecotest	23
2.1.4 Eigene Messungen	24
2.1.5 Simulation	24
2.1.5.1 PHEM	24
2.1.5.2 AuSim	25
2.2 Auswertung der vorhandenen Verbrauchsdaten	27
2.2.1 Vergleich Realverbrauchsdaten mit Herstellerangaben.....	27
2.2.2 Quervergleich zu konventionell betriebenen PKW.....	32
2.2.3 Vergleich Simulation und Messung zu Real- und Typprüfverbrauch.....	33
2.2.3.1 Start-Batterieconditionierung	33
2.2.3.2 Start-Fahrgastraumconditionierung.....	35
2.2.3.3 Gesamter Energieverbrauch.....	36
3 Daten zum Verbrauch von Nicht-Antriebs-Energie (NAE).....	39
3.1 Vorgehen und Datenlage	39
3.2 Anteil der NAE-Verbraucher am Gesamtenergieverbrauch	40
3.3 Abhängigkeit einzelner NAE-Verbraucher von den Umgebungsbedingungen.....	44
3.3.1 Klimatisierung Fahrgastraum.....	46
3.3.2 Batterietemperierung	47
3.3.3 Ladeverluste.....	48
3.4 Entwicklungspotenzial wichtiger NAE-Verbraucher	50
4 Simulation des Einflusses von NAE-Verbrauchern auf den Gesamtenergieverbrauch von BEV...	52
4.1 Fahrzeugdaten	53
4.2 Energieverbrauch Nebenaggregate	54

4.3	Ergebnisse für Beladung nach WLTP	56
4.4	Vergleich HBEFA- und WLTP-Beladung.....	60
5	Vorschläge zur Überarbeitung des WLTP und der Verbrauchskennzeichnungen für BEV.....	62
5.1	Aktuelle Berücksichtigung von NAE-Verbrauchern im WLTP	62
5.2	Relevanz unberücksichtigter NAE-Verbraucher.....	63
5.3	Zentrale Handlungsfelder und Lösungsansätze für eine Überarbeitung des WLTP	64
5.4	Handlungsoptionen und Messbedarf für eine Erweiterung des WLTP	66
6	Quellenverzeichnis	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schema des Simulationsmodells PHEM für Anwendung bei Elektrofahrzeugen	25
Abbildung 2:	Schema des Simulationsmodells AuSym zur Abschätzung des Leistungsbedarfes des HVAC-Systems.....	27
Abbildung 3:	Mittlere Einträge zum Energieverbrauch von Elektro PKW in spiritmonitor.de, korrigierte Werte auf nachgeladenen Realverbrauch „+10 % LV“ und mittlere Typprüfdaten (auch nachgeladener Verbrauch)	28
Abbildung 4:	Realverbrauch nach spiritmonitor.de und Typprüfverbrauch nach Leistungsklassen	29
Abbildung 5:	Realverbrauch nach spiritmonitor.de und Typprüfverbrauchswerte nach Reichweitenklassen	30
Abbildung 6:	Vergleich unterschiedliche Verbrauchsangaben zu einem Sample aus 16 gleichen BEV-PKW Modellen aus den Daten von spiritmonitor.de und ADAC sowie für 2 Modelle aus TU Graz Tests.....	32
Abbildung 7:	Vergleich Realverbrauch konventioneller EURO 6 PKW, gemessen im „Ries-RDE-Test“ an der TU Graz zu den Herstellerangaben nach NEDC und nach WLTP	33
Abbildung 8:	Vergleich Realverbrauch gemessen an der TU Graz, Angaben zu Typprüfwerten und ADAC Ecotest Ergebnis mit Simulationsergebnissen für Volkswagen ID.3	37
Abbildung 9:	Vergleich Realverbrauch gemessen an der TUG, Angaben zu Typprüfwerten und ADAC Ecotest Ergebnis mit Simulationsergebnissen für Renault Zoe.....	37
Abbildung 10:	Berechnete Anteile der NAE an den simulierten Verbrauchswerten	38
Abbildung 11:	Gesamtverbrauch in Abhängigkeit der Außentemperatur.....	45
Abbildung 12:	Verbrauch der HVAC-Komponenten in Abhängigkeit der Außentemperatur	47
Abbildung 13:	Effizienz beim Laden in Abhängigkeit der Ladeleistung	50
Abbildung 14:	Für den mittleren Kompakt-BEV berechnete Energieverbrauchswerte für HVAC und für die Summe der NAE-Verbraucher für verschiedene Umgebungszustände und HVAC-Einstellungen.	55
Abbildung 15:	Berechnete Energieverbrauchswerte für das durchschnittliche Kompakt-BEV für verschiedene Zyklen, Umgebungszustände und HVAC-Einstellungen.....	57
Abbildung 16:	Berechnete Energieverbrauchswerte für das „effiziente“ Kompakt-BEV für verschiedene Zyklen, Umgebungszustände und HVAC-Einstellungen.....	58

Abbildung 17:	Berechnete Energieverbrauchswerte für "normales" und „effizientes“ Kompakt-BEV mit verschiedenen Beladungs- und Fahrwiderstandsettings im Klimamix Deutschland61
Abbildung 18:	Berechnete Energieverbrauchswerte für "normales" und „effizientes“ Kompakt-BEV mit verschiedenen Beladungs- und Fahrwiderstandsettings im Klimamix Deutschland61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittlere Einträge zum Energieverbrauch von Elektro PKW in spiritmonitor.de (vermutlich angezeigter Verbrauch) und mittlere Typprüfdaten (nachgeladener Verbrauch)28
Tabelle 2:	Vergleich von gemessenem und simuliertem NAE-Verbrauch bei Fahrzeugstillstand.....36
Tabelle 3:	Bei der Literaturrecherche verwendete Suchbegriffe (+ "electric car/BEV")39
Tabelle 4:	Mittlerer Leistungsbedarf einzelner NAE-Komponenten nach HBEFA-Simulation für Verbrenner-PKW sowie geschätzte Jahresanteile für BEV42
Tabelle 5:	Energieverbrauch einzelner NAE-Komponenten laut verschiedener Literaturquellen44
Tabelle 6:	Übersicht zu den verwendeten Fahrzyklen52
Tabelle 7:	Übersicht der Fahrzeugdaten für die Simulation des mittleren und des effizienten Kompakt-BEV-PKW53
Tabelle 8:	Klimadaten für die Berechnung der HVAC-Leistungsbedarfe und berechneter Wärmeaustausch zwischen Umgebung und Fahrgastraum.....54
Tabelle 9:	Berechnete Energieverbrauchswerte für Nicht Antriebsaggregate von-BEV für verschiedene Umgebungszustände für typische und effiziente NAE59
Tabelle 10:	Berechnete Energieverbrauchswerte für das typische und das effiziente BEV nach Antrieb und Nicht Antriebsaggregaten für verschiedene Umgebungszustände.....59

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
AuSim	Auxiliary Simulator
BEV	Battery Electric Vehicle
BAB	Bundesautobahn
CAN	Controller Area Network
ECU	Electronic Control Unit
EnVKV	Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
KSG	Klimaschutzgesetz
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LV	Ladeverluste
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
NEDC	New European Driving Cycle
NAE	Nicht-Antriebs-Energieverbrauch
PHEM	Passenger Car and Heavy Duty Emission Model
PTC	Positive Temperature Coefficient
RDE	Real Driving Emissions
RRC	Rolling Resistance Coefficient
SOC	State of Charge
TREMOT	Transportemissionsmodell
UBA	Umweltbundesamt
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle

Zusammenfassung

Hintergrund und Ziel

Die zum 31. August 2021 in Kraft getretene Änderung des deutschen Klimaschutzgesetzes (KSG) verschärft die bisherigen Klimaziele und schreibt das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 fest. Bereits bis 2030 sollen die Gesamtemissionen um 65 % gegenüber 1990 sinken, im Verkehr immerhin um fast 50 %. Es ist also auch relativ kurzfristig eine deutliche Minderung der verkehrlichen Emissionen notwendig.

Zwar sind die CO₂-Emissionen der PKW in den letzten Jahren kaum noch gestiegen, dennoch sind sie nach dem Transportemissionsmodell (TREMOT) in Deutschland mit über 60 % nach wie vor für den Großteil der CO₂-Emissionen aus dem Straßenverkehr verantwortlich. Zentrales Instrument für die Minderung der CO₂-Emissionen von PKW sind die europäischen Flottenzielwerte (Verordnung (EU) 2019/631). Zusätzlich gibt es die PKW-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung (kurz PKW-EnVKV) zur Verbraucherinformation, die die entsprechende Richtlinie (EU) 1999/94 in nationales Recht übersetzt.

Beide nutzen sowohl für Verbrenner als auch für Elektrofahrzeuge (BEV = Battery Electric Vehicle) das WLTP-Testverfahren (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) zur Bestimmung des offiziellen Energieverbrauchs. Dem WLTP-Verfahren liegt der Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) zugrunde. Das Geschwindigkeitsprofil des WLTC bildet im Gegensatz zum vorherigen Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) dynamisches Fahren ab und erreicht Spitzengeschwindigkeiten von etwa 130 km/h. Es handelt sich dennoch um einen Test auf dem Rollenprüfstand und die Abbildung des realen Verbrauchsverhaltens bleibt eingeschränkt. Bereits aufgrund unterschiedlicher Fahrprofile können die realen Energieverbräuche deshalb von den im WLTP ermittelten Werten abweichen.

Neben den Verbrauchsunterschieden durch unterschiedliche Fahrprofile können auch andere Verbraucher (Nicht-Antriebs-Energie = NAE) zu Abweichungen zwischen WLTP- und Realverbrauch führen. So werden die für den Fahrbetrieb elementaren NAE-Verbraucher im WLTP zwar prinzipiell erfasst (z.B. Tagfahrlicht, Steuergeräte, Sensoren und Bremskraftverstärker), die Lenkhilfe bleibt aufgrund fehlender Lenkbewegungen beim Rollenprüfstand jedoch deutlich unterrepräsentiert. Einige dieser NAE-Verbraucher werden zudem mit der 12 V-Batterie betrieben. Da die Energiebilanz der 12 V-Batterie bei dem PEV Type 1 Test nicht ausgeglichen sein muss, können auch diese Verbraucher im WLTP nicht vollständig erfasst sein.

Zudem werden wichtige Verbraucher, vor allem die Klimaanlage, aber z.B. auch Scheinwerfer, Entertainment und Sitzheizungen nicht erfasst. Bei Elektroautos bleibt bei der vorgeschriebenen Prüftemperatur von 23 Grad auch die Batterietemperierung wahrscheinlich unberücksichtigt, da sich die Batterie bereits nahe der optimalen Betriebstemperatur befindet. Ladeverluste sind dagegen im Messverfahren enthalten und werden mit einem genormten Batterie-Entleerungstest bestimmt. Es handelt sich voraussichtlich jedoch um Idealwerte, da der Hersteller eine optimale Ladestrategie wählen darf.

Ziel der Studie war es vor diesem Hintergrund, den Beitrag des NAE-Verbrauchs zum Gesamtverbrauch von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) im Realbetrieb darzustellen. Auf dieser Basis sollten dann Vorschläge entwickelt werden, wie das Verfahren des WLTP für die offiziellen Verbrauchsangaben sinnvoll angepasst und ggf. erweitert werden kann. Die Vorschläge zielen auf eine realitätsnähere Abbildung der Verbräuche von Elektrofahrzeugen im offiziellen Testverfahren WLTP.

Beitrag von NAE-Verbrauchern zum Gesamtverbrauch

Die Studie zeigt, dass der Realverbrauch von BEV im Bereich von etwa 18 kWh/100 km liegt und damit im Mittel etwa 15 % über den im WLTP gemessenen Werten. Der Anteil der NAE-Verbraucher am Gesamtenergieverbrauch liegt dabei zwischen 1 % (auf langen Autobahnstrecken bei ca. 20°C) und 65 % (kurze Stadtfahrt bei -10°C mit Kaltstart). Im Durchschnitt für das deutsche Klima dürfte der Anteil der NAE etwa bei 10 % bis 20 % des Gesamtverbrauchs liegen, wobei etwa ein Drittel dieses NAE-Verbrauchs auf die Konditionierung der Batterie und des Fahrgastraumes nach Kaltstarts entfallen dürfte. Im WLTC wurde zum Vergleich ein Anteil von ca. 3,3 % berechnet. Insgesamt tragen die NAE-Verbraucher demnach voraussichtlich mindestens 10 % zum realen Gesamtenergieverbrauch bei. Unsicherheiten gibt es bezüglich des Einflusses der Batterietemperierung, die bei niedrigen Umgebungstemperaturen zumindest temporär deutlich verbrauchssteigernd wirken kann.

Im Jahresmittel tragen die im WLTP nicht berücksichtigten NAE-Verbraucher damit merklich zum Gesamtverbrauch bei. Die Schwankungen sind jedoch insbesondere bei der Klimatisierung erheblich. Während die Gesamtverbrauchswerte bei 20 Grad Umgebungstemperatur nach den Literaturangaben im Bereich von 15 kWh/100 km liegen, können diese insbesondere bei sehr kalten Temperaturen (- 20 Grad) auf bis das doppelte ansteigen. Bereits bei 0 Grad zeigt sich aber auch schon ein deutlich erhöhter Verbrauch im Bereich von 20 bis 25 kWh pro 100 km. Auch bei hohen Temperaturen steigt der Verbrauch deutlich an und liegt bei 30 Grad bei 20 kWh/100 km, bei 40 Grad sogar bei bis zu 25 kWh/100 km. Insgesamt führen kalte Außentemperaturen jedoch noch zu einer deutlicheren Erhöhung des Verbrauchs als warme Umgebungsbedingungen.

Um einen hohen Passagierkomfort bei möglichst geringen Einsatz der Luft-Heizung zu ermöglichen sind heutige Elektro-PKW bereits zusätzlich mit Quellen körpernaher Wärme ausgestattet. Sitzheizung auf allen Plätzen gehört bei nahezu allen Fahrzeugen zur Serienausstattung, häufig auch in Verbindung mit einer Lenkradheizung. Viele Fahrzeuge bieten zudem einen „Driver-Only-Mode“, so dass der Luftstrom auf den Fahrenden konzentriert werden kann, wenn sich keine weiteren Passagiere im Fahrzeug befinden.

Durch einen verstärkten Einsatz von Wärmepumpen kann auch z.B. die Effizienz des HVAC-Systems erhöht werden. Aber auch die Weiterentwicklung der Wärmepumpensysteme selbst, hat die Einsatzmöglichkeiten in den letzten Jahren weiter erhöht. Insbesondere Effizienz, Platzbedarf, Gewicht und Einsatzmöglichkeit bei niedrigen Temperaturen sollen zudem weiter verbessert werden. Neben den Wärmepumpen werden parallel auch klassische Elektroheizungen, Lüfter und Pumpen weiterentwickelt, um die Effizienz der elektrischen Zusatzheizungen weiter zu steigern. In Verbindung mit der intelligenten Steuerung können die Bauteile zunehmend stufenlos geregelt werden, was zu weiteren Einsparungen führt (Peng und Du 2016).

Die Daten lassen dabei vermuten, dass einige Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs bereits heute verbreitet eingesetzt werden, wie z.B. eine Wärmepumpe zum Heizen. Darauf deutet unter anderem der im Mittel dann doch begrenzte Mehrverbrauch von 15 % im Realbetrieb gegenüber dem WLTP hin. Es wird also wahrscheinlich auch zukünftig eine relevante Diskrepanz zwischen dem Verbrauch im WLTP und auf der Straße bestehen, was für eine Anpassung des WLTP spricht, um diese Lücke zu schließen.

Es lagen jedoch keine statistischen Daten zur Verbreitung von Wärmepumpen sowie zu typischen Strategien zur Batteriekonditionierung in der BEV-Flotte vor, so dass das weitere Optimierungspotenzial unsicher ist. Die Bandbreite der Daten zeigt dabei, dass Optimierungstechnologien wahrscheinlich auch noch nicht durchgängig eingesetzt werden. Dies

spricht wiederum für Maßnahmen, um effiziente Technologien verstärkt am Markt durchzusetzen. So wurde das Reduktionspotenzial der NAE-Verbraucher selbst konservativ im Bereich von 15 % abgeschätzt.

Die Ladeverluste liegen nach der Literaturlauswertung im Mittel bei 17,5 % und sind damit sehr relevant. Diese sind zwar im WLTP prinzipiell enthalten, jedoch unter idealisierten Bedingungen. Abweichungen davon in der Praxis können also zu deutlich höheren Realverbräuchen führen. Übereinstimmend zeigen die Studien z.B. einen schlechteren Wirkungsgrad im Bereich niedriger Ladeleistungen (kleiner 6 kW) und insgesamt liegen die Werte in einer Bandbreite von 10 bis 26 %. Neben der Ladeleistung kann auch die Umgebungstemperatur relevant sein. So zeigt der Wirkungsgrad bei -15°C eine Spannbreite zwischen 62 % und 89 % und bei +40°C zwischen 77 % und 90 %.

Handlungsfelder für eine Überarbeitung des WLTP

Ziel für eine Überarbeitung des WLTP ist eine realitätsnähere Abbildung der Verbräuche von BEV-PKW. Dabei wird durch die Integration bisher unberücksichtigter NAE-Verbraucher auch ein Anreiz für die Hersteller geschaffen, diese effizienter zu gestalten. Hier bestehen Einzelpotenziale auf Komponentenebene und auch Optimierungsmöglichkeiten durch die Vernetzung der Komponenten und Regelungsstrategien zur Heizung und Kühlung des Innenraums und der Batterie.

Vor dem Hintergrund des Beitrags einzelner NAE-Verbraucher zum Gesamtverbrauch ist insbesondere die (realitätsnähere) Abbildung von Klimatisierung, Batterietemperierung und Ladeverlusten von Bedeutung. Weitere Verbraucher haben nach den Recherchen einen deutlich niedrigeren mittleren Leistungsbedarf oder sehr kurze Nutzungszeiten.

Wahrscheinlich einfach zu integrieren wären hier z.B. die Scheinwerfer. Dies ist bisher unberücksichtigt, könnten aber prinzipiell während des Rollentests eingeschaltet bleiben. Damit würde jedoch eine Überschätzung deren Real-Verbrauchs entstehen. Alternativ bietet sich eine zeitweise Anschaltung (z.B. in einem der beiden WLTC-Zyklen) an.

Der Energieverbrauch der Lenkhilfe kann dagegen am Prüfstand prinzipiell nicht sinnvoll erhoben werden, da dort keine Lenkbewegungen notwendig und möglich sind. Auch Sitz- oder Lenkradheizung können prinzipiell (zumindest saisonal) relevante Verbraucher sein, sind aber keine Standardausstattung und können auch positive Effekte auf die Klimatisierung haben, da eine sehr zielgerichtete Erwärmung der Passagiere erfolgt.

Demgegenüber ist die Klimatisierung der größte NAE-Verbraucher, der zudem im WLTP komplett unberücksichtigt bleibt. Dabei ist die Kühlung nur schwer im Rollentest realitätsnah zu messen. Neben der Umgebungstemperatur hat hier insbesondere die Solarstrahlung einen großen Einfluss. Diese könnte wohl nur durch Strahler simuliert werden, allerdings müssten dafür Strahler bezüglich Intensität, Spektrum und Fläche normiert werden, da in Kfz Solarsensoren integriert sind, deren Signal in die Regelstrategie der Klimaautomatik einfließt. Alternativ oder zusätzlich wäre ein zusätzlicher Rollentest ohne Solarstrahler aber bei höherer Temperatur als 23 Grad möglich, z.B. bei 30 Grad mit einer geforderten Innenraumtemperatur von z.B. 20 Grad. Die erforderliche Kühlleistung entspräche ohne die Solarstrahlung zwar nicht einem entsprechenden Sommertag, die Effizienz der Klimaanlage wäre aber näherungsweise abgebildet.

In Deutschland kann jedoch vor allem die Heizung einen hohen zusätzlichen Energieverbrauch haben. Der Heizbedarf ließe sich bei einem entsprechenden Kältetest z.B. bei 0 Grad recht gut am Prüfstand abbilden. Ein solcher Test würde zugleich ggf. auch eine Batterietemperierung abbilden. Die Leistungsbedarfe für das Heizen der Batterie treten in der Regel nur kurzfristig auf

und können gleichzeitig auch positive Effekte auf die Leistungsfähigkeit sowie Lebensdauer der Batterie und die thermischen Verluste in der Batterie haben. Ein zusätzlicher Test, z.B. WLTC bei 0°C Kaltstart, würde Anreiz zu weitergehenden Optimierungen des Thermomanagements schaffen und das Ergebnis wäre als Kundeninformation relevant. Auch hier müsste eine Methode zur Überprüfbarkeit der realitätsnahen Regelung geschaffen werden, da die Effekte auf die Lebensdauer der Batterie und den Fahrerkomfort im realen Betrieb ganz wesentliche Regelgrößen sind, in einem Rollentest aber keine Relevanz haben.

Schlussendlich sind bei BEV auch die Ladeverluste mit durchschnittlich 17,5 % sehr relevant. Hier haben sich vor allem Abhängigkeiten von der Ladeleistung gezeigt. Die Höhe der Verluste hängt vor allem von den im Kfz integrierten Spannungs- und Wechsel-/Gleichstromwandlern ab. Da Ladeverluste bisher im WLTP nur unter idealen Bedingungen enthalten sind (22 kW oder andere/effizientere Ladeleistung nach Wahl der Hersteller), könnten hier ggf. Messungen bei anderen oder mehreren Ladeleistungen sinnvoll sein. Die fahrzeugspezifischen Werte zeigen, dass die Hersteller Bordladegeräte mit einem hohen Wirkungsgrad entwickeln können. Eine Verpflichtung der Hersteller ihrerseits die Ladeverluste bei den technischen Angaben aufzuführen würde den Anreiz erhöhen effizientere Bordladegeräte in den Fahrzeugen einzusetzen. Auch thermische Abhängigkeiten wurden festgestellt. Die großen Bandbreiten zeigen, dass hier Optimierungspotenzial besteht. Höhere thermische Verluste bei niedrigen Temperaturen könnten jedoch ebenfalls durch einen 0 Grad Test erfasst werden.

Fraglich ist aber, ob Laden bei kalter Batterie in der Realität häufig auftritt. Bei Ladung direkt nach einem Kälte-Test wäre die Batterie bereits weitgehend erwärmt. Inwieweit anschließend noch ein relevanter Energieverbrauch zum Warmhalten der Batterie während des Ladevorganges auftritt, konnte noch nicht ermittelt werden. Bei niedrigen Ladeleistungen könnte die Batterie tatsächlich auskühlen, hätte aber dennoch wenig Verluste und könnte mit der geringen Leistung auch laden. Inwieweit niedrige Ladeströme und kalte Batterien einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer haben, ist nicht bekannt. Bei hohen Ladeleistungen würden die Ladeverluste ein schnelles Auskühlen verhindern.

Handlungsoptionen

Vor dem Hintergrund des großen Aufwands der mit einer Erweiterung bzw. Anpassung des WLTP, sowohl im politischen Prozess als bei den Messungen für die Typzulassung, verbunden ist, sollten zunächst Handlungsoptionen ohne Anpassung des WLTP geprüft werden. Hier sind Anreizwirkungen zum Einsatz effizienter Technologie von transparenten Verbraucherinformationen zu unterscheiden. Effiziente Technologien lassen sich ggf. auch direkt über Ökodesignanforderungen, z.B. für BEV-Ladegeräte oder Vorgaben für die Effizienz der Klimaanlage, durchsetzen. So wurde für Ladegeräte bereits seitens der Europäischen Kommission im Arbeitsprogramm für Ökodesign und Energieverbrauchskennzeichnung festgestellt, dass es sinnvoll ist, „... Anforderungen festzulegen, bevor große Mengen potenziell ineffizienter Ladegeräte installiert werden“ (Europäische Kommission 2022). Separate Tests für Klimaanlage sind dagegen mit eher hohem Aufwand verbunden (siehe oben) und würden dann auch separate Messungen erfordern. Bezüglich transparenter Verbraucherinformationen könnten zumindest die Ladeverluste bereits aus den heute gemessenen Typgenehmigungsdaten bestimmt werden und könnten so ohne weitere Messungen separat, z.B. im sogenannten PKW-Label, dargestellt werden.

Zentral für eine realitätsnähere Abbildung des Verbrauchs von BEV ist jedoch die Erfassung des Verbrauchs bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, insbesondere kalten Temperaturen. Der Verbrauch durch NAE ist bei den 23°C des WLTP deutlich geringer als bei tieferen oder höheren Temperaturen. Für PKW mit Ottomotoren ist in der Typprüfung ein WLTC Testzyklus

bei -7°C zu messen um die Kaltstartemissionen dieser Fahrzeuge zu prüfen (Typ 6 Test im WLTP nach Regulierung (EU) 2017/1151). Um Verbrauch und CO₂-Emissionen von Verbrenner-PKW bei mittlerer Europäischer Temperatur zu bestimmen, ist für je ein Kfz einer Familie ein ATCT (Ambient Temperature Correction Test) bei 14°C vorgeschrieben. Mit diesem Test wird der Mehrverbrauch gegenüber dem Standard Test bei 23°C ermittelt.

Bei BEV werden solche Tests bisher nicht standardmäßig durchgeführt und müssten analog zu Verbrenner-PKW als Zusatztest eingeführt werden. Da der Heizenergiebedarf bei BEV unter 14°C überproportional zunehmen kann, dürfte ein Test z.B. bei 0°C aussagekräftiger sein als ein 14°C Test. Wenn nach dem 0°C Test auch mit anderer Leistung geladen werden müsste, könnten durch den einen Zusatztest gleichzeitig Daten zu den Ladeverlusten bei zwei verschiedenen Ladesystemen gewonnen werden. Z.B. könnte der zweite Ladevorgang mit der maximal vom Kfz unterstützten Leistung erfolgen. Prinzipiell könnte analog zu Otto-Pkw auch ein - 7°C Test übernommen werden. Für den deutschen Winter werden jedoch 0°C als repräsentativer angesehen und sind weniger aufwendig in der Vorkonditionierung.

Würden Daten bei einer niedrigeren Temperatur standardmäßig erfasst, könnten diese differenziert berichtet und/oder auch in einem gewichteten mittleren Verbrauchswert berücksichtigt werden. Empirische Daten zur realitätsnahen Wichtung zwischen 0 Grad-, 23 Grad- und ggf. auch 30 Grad-Test müssten dafür entsprechend ausgewertet werden. Zusätzlich wäre auch die Kommunikation der einzelnen Werte im Rahmen des PKW-Label sinnvoll. Dies könnte analog der differenzierten Verbrauchswerte erfolgen (innerorts, außerorts, kombiniert). Darüber hinaus bietet das PKW-Label auch die Möglichkeit, zusätzlich erfasste Verbrauchswerte und Ladeverluste unter anderen Bedingungen (Umgebungstemperatur, Ladeleistung) zunächst nur informatorisch zu verwenden, also im Sinne eines Monitorings.

Abschließend kann festgestellt werden, dass wahrscheinlich auch zukünftig eine relevante Diskrepanz zwischen dem Verbrauch im WLTP und auf der Straße bestehen wird. Die Lücke wird maßgeblich durch die Klimatisierung bestimmt, die derzeit nicht in Typprüfmessungen erfasst wird. Daher können transparente Verbraucherinformationen, die auch diesen Beitrag beinhalten sollen, wahrscheinlich nur durch zusätzliche Messungen im Rahmen des WLTP erreicht werden. Bevor diese Forderung politisch intensiv verfolgt wird, empfiehlt sich jedoch die Messung einiger BEVs im WLTP bei 23°C und bei 0°C, um belastbarere Daten als Argumentationsgrundlage zu schaffen. In diesem Zusammenhang könnte auch ein Vorschlag für den Testablauf und die Auswertung ausgearbeitet werden.

Die Bandbreite der Daten und die Abschätzung eines optimierten BEV im Rahmen der Studie zeigt dabei auch, dass Optimierungstechnologien wahrscheinlich noch nicht durchgängig eingesetzt werden. Auch dies könnte mit einem Kälte-Test im WLTP befördert werden. Geht es aber allein um den Einsatz bestimmter Technologien und nicht um die transparente Verbraucherinformation können hier ggf. auch Alternativen geprüft werden, die direkte Vorgaben machen (z.B. über die Ökodesignrichtlinie).

Summary

Background and goal

The amendment to the German Climate Protection Act (KSG), which came into force on 31 August 2021, tightens the previous climate targets and sets the goal of greenhouse gas neutrality by 2045. By 2030, total emissions are to be reduced by 65 % compared to 1990, and by almost 50 % in the transport sector. A significant reduction in transport emissions is therefore also necessary in the relatively short term.

Although CO₂ emissions from passenger cars have not increased in recent years, according to the Transport Emissions Model (TREMOD) they are still responsible for the majority of CO₂ emissions from road traffic in Germany, at over 60%. The central instrument for reducing CO₂ emissions from passenger cars is the European fleet target values (Regulation (EU) 2019/631). In addition, there is the Passenger Car Energy Consumption Labelling Ordinance (PKW-EnVKV for short) for consumer information, which translates the corresponding Directive (EU) 1999/94 into national law.

Both use the WLTP test procedure (Worldwide harmonised Light vehicles Test Procedure) to determine the official energy consumption for both internal combustion vehicles and electric vehicles (BEV = Battery Electric Vehicle). The WLTP procedure is based on the Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC). In contrast to the previous New European Driving Cycle (NEDC), the speed profile of the WLTC reflects dynamic driving and reaches top speeds of around 130 km/h. Nevertheless, it is a test on a chassis dynamometer and the representation of real-world consumption behaviour remains limited. Due to different driving profiles alone, the real energy consumption can therefore deviate from the values determined in the WLTP.

In addition to the differences in consumption due to different driving profiles, other consumers (non-drive energy = NAE) can also lead to deviations between WLTP and real consumption. For example, although the NAE consumers that are elementary for driving are recorded in principle in the WLTP (e.g. daytime running lights, control units, sensors and brake boosters), the power steering remains significantly underrepresented due to the lack of steering movements on the chassis dynamometer. Some of these NAE consumers are also powered by the 12 V battery. Since the state of charge of the 12 V battery does not have to be balanced in the PEV Type 1 test, these consumers may also not be fully covered in the WLTP.

In addition, important consumers, especially the air-conditioning system, but also, for example, headlights, entertainment and seat heaters, are not covered. In the case of electric cars, the prescribed test temperature of 23 degrees also probably does not take battery temperature control into account, as the battery is already close to the optimal operating temperature. Charging losses, on the other hand, are included in the measurement procedure and are determined with a standardised battery discharge test. However, these are probably ideal values, as the manufacturer is allowed to choose an optimal charging strategy.

Against this background, the aim of the study was to analyse the contribution of NAE consumption to the overall consumption of battery electric vehicles (BEV) in real-world operation. On this basis, proposals were then developed as to how the WLTP procedure can be sensibly adapted and, if necessary, expanded for the official consumption data. The proposals aim at a more realistic representation of the consumption of electric vehicles in the official WLTP test procedure.

Contribution of NAE consumers to total consumption.

The study shows that the real-world consumption of BEVs is in the range of about 18 kWh/100 km, which is on average about 15 % higher than the values measured in the WLTP. The share of NAE consumption in total energy consumption ranges from 1 % (long motorway trips at about 20°C) to 65 % (short city trips at -10°C with a cold start). On average for the German climate, the NAE share is likely to be around 10 % to 20 % of total consumption with around one third of this NAE consumption being accounted for by conditioning the battery and passenger compartment after cold starts. In the WLTC, a share of 3.3 % was calculated for comparison. Overall, the NAE consumers are therefore expected to contribute at least 10 % to the real total energy consumption. Uncertainties exist with regard to the influence of battery temperature control, which can significantly increase consumption at low ambient temperatures, at least temporarily.

On an annual average, the NAE consumers not taken into account in the WLTP thus make a noticeable contribution to total consumption. However, the fluctuations are considerable, especially in the case of air conditioning. While the total consumption values at an ambient temperature of 20 degrees are in the range of 15 kWh/100 km according to the literature, these can increase to up to twice that amount, especially at very cold temperatures (- 20 degrees). Even at 0 degrees, however, consumption is already significantly higher, in the range of 20 to 25 kWh per 100 km. At high temperatures, consumption also increases significantly, reaching 20 kWh/100 km at 30 degrees and even up to 25 kWh/100 km at 40 degrees. Overall, however, cold outside temperatures still lead to a more significant increase in consumption than warm ambient conditions.

To ensure a high level of passenger comfort while minimising the use of air heating, today's electric cars are already equipped with additional sources of body heat. Seat heating on all seats is standard equipment in almost all vehicles, often in combination with steering wheel heating. Many vehicles also offer a "driver-only mode" so that the airflow can be concentrated on the driver when there are no other passengers in the vehicle.

Increased use of heat pumps can also, for example, increase the efficiency of the HVAC-system. But also the further development of the heat pump systems themselves have increased the application possibilities in recent years. In particular, efficiency, space requirements, weight and application possibilities at low temperatures are to be further improved. In addition to the heat pumps, classic electric heaters, fans and pumps are also being further developed in parallel in order to further increase the efficiency of the electric auxiliary heaters. In combination with intelligent control, the components can increasingly be regulated steplessly, leading to further savings (Peng and Du 2016).

In this context, the data suggest that some measures to reduce energy consumption are already widely used today, such as a heat pump for heating. This is indicated, among other things, by the limited average additional consumption of 15 % in real-world operation compared to the WLTP. Thus, a relevant discrepancy between consumption in the WLTP and on the road will probably continue to exist in the future, which argues for an adjustment of the WLTP to close this gap.

However, no statistical data was available on the prevalence of heat pumps as well as typical battery conditioning strategies in the BEV fleet, so the further optimisation potential is uncertain. The range of data here shows that optimisation technologies are probably not yet universally used. This speaks in favour of measures to increase the market penetration of efficient technologies. For example, the reduction potential of the NAE consumers themselves was conservatively estimated in the range of 15 %.

According to the literature evaluation, charging losses average 17.5 % and are thus very relevant. These are included in principle in the WLTP, but under idealised conditions. Deviations

from this in practice can therefore lead to significantly higher real consumption. The studies consistently show, for example, poorer efficiency in the range of low charging powers (less than 6 kW) and overall the values lie in a range of 10 to 26 %. In addition to the charging power, the ambient temperature can also be relevant. For example, the efficiency at -15°C shows a range between 62 % and 89 % and at +40°C between 77 % and 90 %.

Fields of action for a revision of the WLTP

The goal is a more realistic depiction of the consumption of BEV passenger cars in the WLTP. In addition, the integration of previously unconsidered NAE consumers would also create an incentive for manufacturers to make them more efficient. There is individual potential here at component level and also optimisation opportunities through the networking of components and control strategies for heating and cooling the interior and the battery.

Against the background of the contribution of individual NAE consumers to overall consumption, the (more realistic) consideration of air conditioning, battery temperature control and charging losses is particularly important. According to the research, other consumers have a significantly lower average power demand or very short usage times.

Headlights for instance would probably be easy to integrate here. These have not been taken into account so far, but could in principle remain switched on during the test. However, this would result in an overestimation of their real consumption. Alternatively, they could be switched on temporarily (e.g. in one of the two WLTC cycles).

The energy consumption of the power steering, on the other hand, cannot be meaningfully measured on the test bench, as no steering movements are necessary or possible there. Seat or steering wheel heating can also be relevant consumers in principle (at least seasonally), but they are not standard equipment and can also have positive effects on the air conditioning, since a very targeted heating of the passengers takes place.

In contrast, air conditioning is the largest NAE consumer, which is also completely disregarded in the WLTP. Cooling is difficult to measure realistically in the test. In addition to the ambient temperature, solar radiation in particular has a major influence. This could probably only be simulated by radiators, but those would have to be standardised in terms of intensity, spectrum and surface area, since solar sensors are integrated in cars and their signals are used in the control strategy of the automatic climate control system. Alternatively or additionally, an additional test without solar radiators would be possible at a higher temperature than 23 degrees, e.g. at 30 degrees with a required interior temperature of e.g. 20 degrees. The required cooling capacity would not correspond to a summer day without the solar radiation, but the efficiency of the air conditioning system would be approximately considered.

The study also shows that in Germany, heating in particular can lead to a high additional energy consumption. The heating requirement could be represented quite well on the test bench in a corresponding cold test, e.g. at 0 degrees. At the same time, such a test would also include battery temperature control. The power requirements for battery heating usually only occur for a short time and can also have positive effects on the performance and service life of the battery and the thermal losses in the battery. An additional test, e.g. WLTC at 0°C cold start, would create an incentive for further optimisation of the thermal management and the result would be relevant as customer information. Here, too, a method for considering the realistic control would have to be created, since the effects on battery life and driver comfort are very important variables in real operation, but have no relevance in a roller test.

Finally, charging losses are also very relevant for BEVs, averaging 17.5 %. Here, dependencies on the charging power have been shown. The level of losses depends primarily on the voltage and

AC/DC converters integrated in the vehicle. Since charging losses are so far only included in the WLTP under ideal conditions (22 kW or other/efficient charging power at the manufacturer's choice), measurements at other or several charging powers could be useful here. The vehicle-specific values show that manufacturers can develop on-board chargers with a high efficiency. An obligation on the part of the manufacturers to include the charging losses in the technical specifications would increase the incentive to use more efficient on-board chargers in the vehicles. Thermal dependencies were also identified. The wide ranges show that there is potential for optimisation here. However, higher thermal losses at low temperatures could also be recorded by a 0 degree test.

However, it is questionable whether charging when the battery is cold occurs frequently in reality. When charging directly after a cold test, the battery would already be largely warmed up. It has not yet been possible to determine to what extent a relevant energy consumption still occurs to keep the battery warm during the charging process. At low charging powers, the battery could indeed cool down, but would still have few losses and could also charge with low power. To what extent low charging currents and cold batteries have a negative influence on the service life is not known. At high charging powers, the charging losses would prevent rapid cooling.

Options for action

Against the background of the challenges associated with an extension or adaptation of the WLTP, both in the political process and in the measurements for type approval, options for action without adapting the WLTP should first be examined. Incentives for the use of efficient technology must be distinguished from transparent consumer information. Efficient technologies can also be promoted directly via eco-design requirements, e.g. for BEV chargers or specifications for the efficiency of air conditioning systems. For chargers, for example, the European Commission's Ecodesign and Energy Labelling Work Programme has already stated that it makes sense to set requirements before large quantities of potentially inefficient chargers are installed (European Commission 2022). Separate tests for air conditioning, on the other hand, are rather challenging (see above) and would then also require separate measurements. With regard to transparent consumer information, at least the charging losses could already be determined from the type approval data measured today and could thus be presented separately without further measurements, e.g. in the so-called passenger car label.

Central to a more realistic depiction of the consumption of BEVs, however, is the recording of consumption under different ambient conditions, especially cold temperatures. Consumption by NAE is significantly lower at the 23°C of the WLTP than at lower or higher temperatures. For passenger cars with petrol engines, a WLTC test cycle at -7°C is to be measured in the type test in order to test the cold start emissions of these vehicles (type 6 test in WLTP according to regulation (EU) 2017/1151). In order to determine the consumption and CO₂ emissions of combustion engine passenger cars at average European temperatures, an ATCT (Ambient Temperature Correction Test) at 14°C is prescribed for one vehicle of each family. This test is used to determine the additional consumption compared with the standard test at 23°C.

Such tests are not yet carried out as standard for BEVs and would have to be introduced as an additional test. Since the heating energy requirement for BEVs can increase disproportionately below 14°C, a test at 0°C, for example, should be more meaningful than a 14°C test. If, after the 0°C test, charging would also have to be carried out at a different power, the one additional test could simultaneously provide data on charging losses with two different charging systems. For example, the second charging process could be carried out with the maximum power supported by the vehicle. In principle, a - 7°C test could also be adopted in analogy to petrol cars. For the

German winter, however, 0°C is considered more representative and is less costly in terms of preconditioning.

If data were collected at a lower temperature as standard, these could be reported in a differentiated manner and/or also included in a weighted average consumption value. Empirical data for realistic weighting between 0 degree, 23 degree and possibly also 30 degree test would have to be evaluated accordingly for this. In addition, it would also make sense to communicate the individual values within the framework of the passenger car label. This could be done analogously to the differentiated consumption values (urban, extra-urban, combined). Furthermore, the passenger car label also offers the possibility of presenting additionally recorded consumption values and charging losses under other conditions (ambient temperature, charging power) initially only for information purposes, i.e. in the sense of monitoring.

In conclusion, it can be stated that a relevant discrepancy between consumption in the WLTP and on the road will probably continue to exist in the future. The gap is largely determined by air conditioning, which is currently not recorded in type approval measurements. Therefore, transparent consumer information, which should also include this contribution, can probably only be achieved through additional measurements in the context of the WLTP. However, before this demand is pursued intensively politically, it is recommended to measure some BEVs in the WLTP at 23°C and at 0°C in order to create data as a basis for argumentation. In this context, a proposal for the test procedure and evaluation could also be elaborated.

The range of data and the estimation of an optimised BEV within the scope of the study also shows that optimisation technologies are probably not yet used universally. This could also be promoted with a cold test in the WLTP. However, if the focus is solely on the use of certain technologies and not on transparent consumer information, alternatives that make direct specifications (e.g. via the Ecodesign Directive) can also be examined here.

1 Hintergrund und Ziel der Studie

Die zum 31. August 2021 in Kraft getretene Änderung des deutschen Klimaschutzgesetzes (KSG) verschärft die bisherigen Klimaziele und schreibt das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 fest. Bereits bis 2030 sollen die Gesamtemissionen um 65 % gegenüber 1990 sinken, im Verkehr immerhin um fast 50 %. Es ist also auch relativ kurzfristig eine deutliche Minderung der verkehrlichen Emissionen notwendig.

Zwar sind die CO₂-Emissionen der PKW in den letzten Jahren kaum noch gestiegen, dennoch sind sie nach dem Transportemissionsmodell (TREMODO) in Deutschland mit über 60 % nach wie vor für den Großteil der CO₂-Emissionen aus dem Straßenverkehr verantwortlich. Zentrales Instrument für die Minderung der CO₂-Emissionen von PKW sind die europäischen Flottenzielwerte (Verordnung (EU) 2019/631). Zusätzlich gibt es die PKW-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung (kurz PKW-EnVKV) zur Verbrauchsinformation, die die entsprechende Richtlinie (EU) 1999/94 in nationales Recht übersetzt.

Beide nutzen sowohl für Verbrenner als auch für Elektrofahrzeuge (BEV = Battery Electric Vehicles) das WLTP-Testverfahren (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) zur Bestimmung des offiziellen Energieverbrauchs. Dieses Testverfahren fokussiert jedoch auf die Antriebsenergie, während Nebenverbraucher (Nicht-Antriebs-Energie = NAE) nur unzureichend berücksichtigt werden. So bleiben im WLTP die Heizung und Klimatisierung ausgeschaltet.

Bei Elektroautos (BEV) kann der Anteil des NAE-Verbrauchs am Gesamtverbrauch tendenziell noch höher liegen als bei Verbrennern. Infolge der hohen Wirkungsgrade von Batterie und Elektromotor entstehen geringere Wärmeverluste, so dass für die Heizung des Fahrgastraumes bei Elektroantrieben zusätzliche Energie aufgewendet werden muss. Darüber hinaus gibt es im Elektrofahrzeug zusätzliche Verbraucher wie z.B. die Temperierung der Batterie. Solche Heizenergiebedarfe sind im Test nicht erfasst. Ladeverluste sind dagegen in dem Messverfahren zwar enthalten, es handelt sich voraussichtlich jedoch um Idealwerte, da der Hersteller eine optimale Ladestrategie wählen darf.

Bisher gibt es für Elektro-PKW jedoch keine systematische und vollständige Datensammlung und -auswertung zu diesem NAE-Verbrauch, die eine belastbare und realitätsnahe Einordnung gegenüber der Antriebsenergie unter verschiedenen Rahmenbedingungen (vor allem der Umgebungstemperatur) ermöglicht. Die bisher im Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) und entsprechend auch für das von ifeu entwickelte Transport-Emissionsmodell (TREMODO) des UBA genutzte Datenbasis fokussiert eher auf Verbrennerfahrzeuge, was die Gefahr von Fehleinschätzungen bezüglich der aktuellen Lage sowie zukünftiger Entwicklungen birgt.

Ziel der Studie ist es vor diesem Hintergrund, den Beitrag des NAE-Verbrauchs zum Gesamtverbrauch von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) im Realbetrieb darzustellen. Auf dieser Basis werden dann Vorschläge entwickelt werden, wie das Verfahren des WLTP für die offiziellen Verbrauchsangaben sinnvoll angepasst und ggf. erweitert werden kann. Die Vorschläge zielen auf eine realitätsnähere Abbildung der Verbräuche von Elektrofahrzeugen im offiziellen Testverfahren WLTP, die dann direkt in Regulierungen und Verbraucherinformation einfließen kann. Zusätzlich können die Ergebnisse über das Projekt hinaus Eingang in das HBEFA und TREMOD finden. Damit ergeben sich auch Hinweise, wie TREMOD und HBEFA zukünftig weiterentwickelt werden könnten um eine realitätsnähere Abbildung der Emissionen zu gewährleisten.

2 Reale Energieverbräuche von BEV und Lücke zu offiziellen Angaben nach WLTP

2.1 Datenquellen zum realen Energieverbrauch von BEV

Um eventuelle systematische Unterschiede zwischen dem im realen Betrieb und dem in der Typprüfung gemessenen Energieverbrauch von BEV zu bestimmen, wurden Daten zum Typprüf- und Realverbrauch gesammelt und eigene Messungen und Simulationen durchgeführt. Die Recherche fokussiert auf PKW, zum Realverbrauch von batterieelektrisch betriebenen LNF wurden keine Daten gefunden. Die Datengrundlagen für die hier dargestellten Analysen waren:

- ▶ Typprüfdaten der BEV nach Zulassungsjahrgängen, zur Verfügung gestellt vom KBA
- ▶ Spritmonitor.de: alle Einträge zu Elektrofahrzeugen mit Stand 15.09.2022
- ▶ ADAC Ecotest (<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/ecotest/>): alle Einträge zu Elektro PKW mit Stand 15.09.2022
- ▶ Eigene Messungen: Messfahrten an einem Volkswagen ID.3 (150 kW) und einem Renault Zoe¹ im Raum Graz von Juli bis August 2022
- ▶ Simulationen der Messfahrten der beiden BEV um Einflüsse von Umgebungszuständen und Nebenaggregaten besser beurteilen zu können.

Die Quellen sind nachfolgend kurz beschrieben, die Ergebnisse im Anschluss zusammengefasst.

2.1.1 Typprüfdaten

Die Typprüfdaten werden gemäß EU Verordnung (EU) 2017/1151 am Rollenprüfstand gemessen und beziehen sich bei allen gängigen BEV-PKW auf den WLTC. Entsprechend dem Messverfahren beinhaltet der angegebene Verbrauchswert auch Ladeverluste. Diese werden mit einem genormten Batterie-Entleerungstest bestimmt. Der Test startet bei voller Batterie und endet, wenn die Spannung nicht mehr ausreicht, um eine Geschwindigkeit von 100 km/h aufrecht zu halten. In dem Test wird u.a. die aus der Hochvolt-Batterie entnommene Energie gemessen. Danach erfolgt eine Ladung der Batterie mit 22 kW, oder einer anderen, vom Hersteller wählbaren Lademethode, bis die Batterie wieder vollgeladen ist. Dabei werden der Ladestrom und die Spannung gemessen. Das Verhältnis der geladenen Energie zu entnommener Energie wird bestimmt und auf die in Subzyklen gemessenen Verbrauchswerte aufgeschlagen.

Der Entladungstest besteht aus zwei Serien mit WLTC gefolgt von low und medium speed Phasen des WLTC und von einer konstanten 100 km/h Phase. Die Länge dieser Konstantfahrten wird so gewählt, dass der Test in der zweiten Konstantfahrt endet. Mit den Konstantphasen wird vermieden, dass Prüfstandsfahrer mehrere Stunden lang den WLTC nachfahren müssen, was erfahrungsgemäß fehlerfrei kaum möglich ist.

Der gemessene Verbrauch wird aus den zwei im Entladungstest enthaltenen WLTC-Zyklen bestimmt. Er stellt einen gewichteten, aus der Batterie entnommenen Energieverbrauch je Kilometer dar. Der Typprüfwert gibt also den Verbrauch im WLTC bei ca. 23°C Kaltstart, inklusive Ladeverluste aber ohne Betrieb nicht erforderlicher NAE-Verbraucher an. Die Ladeverluste dürften Idealwerte sein, da der Hersteller eine optimale Ladestrategie für das Kfz wählen darf.

¹ Lt. Zulassungsschein eine Version mit 51 kW

Einige NAE die im WLTC nötig sind (Steuergeräte, Sensoren etc.) werden mit 12 V betrieben. In der Regulierung ist nicht vorgeschrieben, dass die Energiebilanz der 12 V-Batterie ausgeglichen sein muss. Es ist also möglich, dass der Energieverbrauch dieser NAE im Typprüfzyklus nicht vollständig berücksichtigt ist, wenn die 12 V Batterie im laufenden Test aus der Hochvoltbatterie nachgeladen werden muss.

2.1.2 Spritmonitor.de

In Spritmonitor können sich beliebige Fahrzeugnutzer registrieren und Verbrauchsdaten eingeben. Eine Verifizierung oder Prüfung der Datenqualität erfolgt dabei nicht. Auf der Webseite können die Mittelwerte je eingetragenen Kfz abgerufen werden. Wir haben aus den Einträgen offensichtliche Fehleinträge eliminiert. Diese dürften vorwiegend aus falschen Einheiten resultieren und verursachen mindestens eine Zehnerpotenz Abweichung zum Mittelwert (kWh/km oder kWh/100km bzw. Wh/100km statt der erwarteten Wh/km).

Insgesamt konnten wir 4.292 Einträge nutzen. Als „Eintrag“ bezeichnen wir hier den Mittelwert aus allen eingegeben Verbrauchswerten eines Fahrzeugnutzers für seinen Elektro-PKW. Aus diesen haben wir alle Kfz-Modelle zur weiteren Analyse genutzt, für die mindestens fünf verschiedene Nutzer Einträge gemacht haben. Dieser Filter hat die Gesamtergebnisse allerdings nicht signifikant verändert.

Wesentliche Unsicherheiten der Datenquelle sind, dass unbekannt ist, zu welchem Anteil die Nutzer die im Kfz angezeigten Verbrauchswerte oder die nachgeladenen Energiemengen eingetragen haben. Bei mittleren Ladeverlusten von ca. 15 % bis 20 % (siehe Kapitel 3.3.3), stellt dieser unbekannte Anteil eine erhebliche Unsicherheit dar. Zudem ist auch die Modellvariante bezüglich elektrischer Reichweite, sofern verschiedene Batteriekapazitäten angeboten sind, nicht vermerkt. Generell ist auch nicht bekannt, ob die Eintragenden durchschnittliches Fahrverhalten aufweisen oder im Vergleich zum Durchschnittsfahrer besonders kurze/lange Strecken, in besonders ökologischer/sportlicher Fahrweise fahren. Wegen der großen Stichprobe realer Fahrer ist der Datensatz dennoch eine relevante Quelle zum Realverbrauch.

Da auch die Typprüfwerte und die ADAC Ecotestdaten inklusive Ladeverlust angegeben sind, müssen in einem sinnvollen Vergleich auch die Realverbräuche aus Spritmonitor.de inklusive der Ladeverluste dargestellt werden. Mangels belastbarer Informationen haben wir angenommen, dass etwa die Hälfte ohne Ladeverluste eingetragen hat und haben zur Korrektur auf nachgeladene Energie die spritmonitor.de Einträge um 10 % erhöht.

2.1.3 ADAC Ecotest

Der ADAC führt im Rahmen seines Ecotests Emissions- und Verbrauchsmessungen an PKW mit unterschiedlichen Antriebssystemen durch². Für Elektro-PKW verwendet der ADAC einen speziellen Rollentest, der aus dem WLTC mit zwei angehängten BAB Teilzyklen besteht. Der Zyklus dauert 1.960 Sekunden und ist 28,5 km lang mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 52 km/h. Der Zyklus repräsentiert ca. 40 % Autobahn und je 30 % Außerorts- und Innerortsfahrt und bildet so die von PKW durchschnittlich gefahrenen Streckenanteile gut ab. Inwieweit der WLTC auch für Elektro-PKW bezüglich Beschleunigungsverhalten und Maximalgeschwindigkeiten repräsentativ ist, ist unbekannt. Für Otto- und Dieselmotor betriebene PKW dürfte er eher unter dem durchschnittlichen Fahrverhalten liegen (Eisenmann, 2019).

² <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/ecotest/>

Der ADAC Ecotest wird mit den Fahrwiderständen aus der Typprüfung (Herstellerangabe) aber mit einem Leergewicht zuzüglich 200 kg Zuladung gemessen, was eine um ca. 40 kg höhere Testmasse als in der Typprüfung bedeutet. Der Verbrauch wird auch mit der gemessenen, nachgeladenen Energie bei üblicherweise 22 kW Ladeleistung bestimmt.

2.1.4 Eigene Messungen

Die Messungen und Auswertungen konnten im Rahmen von zwei Bachelor-Arbeiten am ITnA der TU Graz im Sommer 2022 durchgeführt werden (siehe Moritz, 2022) und (Schiechl, 2022)). Dabei wurden zwei BEV gemietet und in verschiedenen Realzyklen auf der Straße gefahren. Dabei wurden der angezeigte Verbrauch, der nachgeladene Verbrauch und die Wetterbedingungen (Temperatur, Feuchte, Sonnenstrahlung) notiert und die Strecke und Geschwindigkeit mittels GPS aufgezeichnet. Ein Zugang zur Messung der Hochvoltströme war im Rahmen dieser Arbeiten nicht möglich. Folgende Tests wurden gefahren:

Ries-RDE-Test:	Standard Runde, die auch für RDE-Tests an konventionellen PKW und LNF genutzt wird. Start nach Vorkonditionierung bei Umgebungsbedingung oder nach Vorkonditionierung bei 0°C im Prüfstandsraum
Stadtrunde:	Fahrt ab Institut durch die Stadt
Wolfsberg-Graz:	Vorwiegend Autobahnfahrt mit 100 km/h über den Packsattel
Wien-Graz:	Vorwiegend Autobahnfahrt von Wien nach Graz
Klimatests	Verbrauchsmessung bei eingeschalteter Zündung im Stillstand über eine Stunde bei unterschiedlicher Fahrzeug-Vorkonditionierung (Parken im Schatten, Parken in der Sonne) zur Abschätzung des Energieverbrauchs der Klimaanlage.

Die Genauigkeit der Verbrauchsanzeige der Kfz ist unsicher, die nachgeladene Energiemenge sollte dagegen exakt sein. Durch die Aufzeichnung der Strecke mit GPS konnten die Fahrten auch simuliert werden. Damit ist auch die Streckenlänge genau bestimmt, so dass die nachgeladenen kWh/km ein robuster Wert sind. Das Höhenprofil wurde für die Simulation aus Geländedaten basierend auf den x-y-GPS Koordinaten interpoliert.

2.1.5 Simulation

Die Simulation der Energieverbrauchswerte der Elektrofahrzeuge erfolgte in diesem Projekt mit dem Modell PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) der TU Graz, das auch für die Berechnung der Emissionsfaktoren der Kfz im HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) verwendet wird.

Die Simulation des Energieverbrauches von NAE erfolgte mit einem Modell der TU Graz, dessen Grundlagen im Rahmen der Entwicklung eines Testverfahrens für PKW-Klimaanlagen mit konventionellen Antrieben für die EU-Kommission erstellt wurde (siehe z.B. (Hausberger, 2013)). Für das vorliegende Projekt wurde das Modell zur Berechnung rein elektrisch betriebener Kfz angepasst. Wir nennen das Modell im Weiteren AuSim (Auxiliary Simulator).

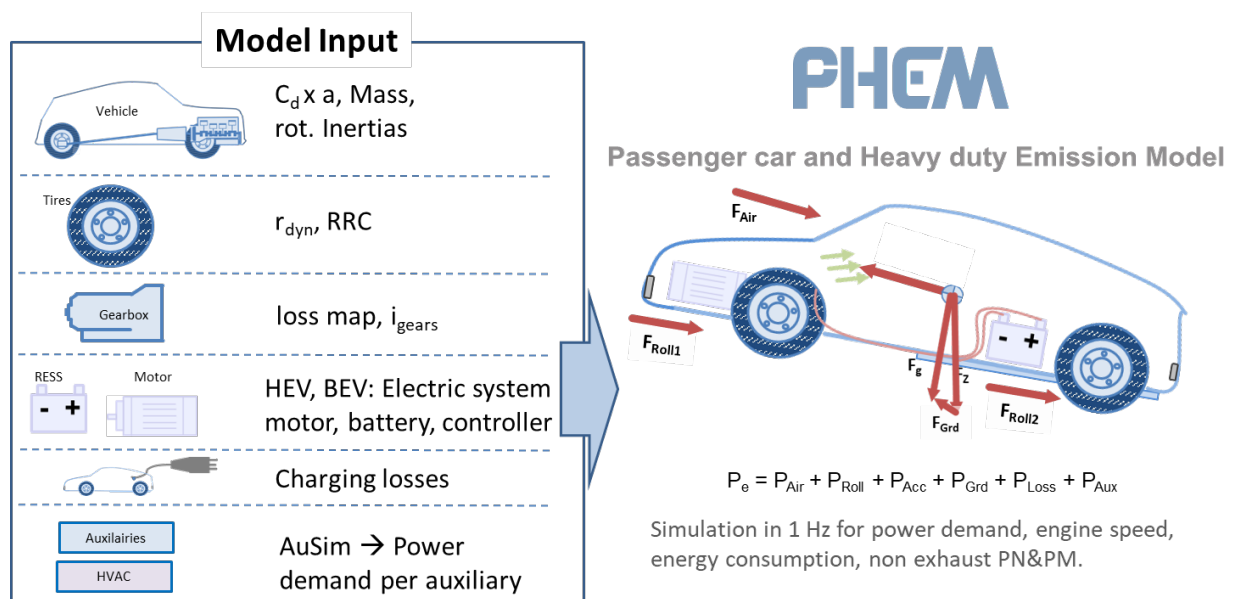
2.1.5.1 PHEM

Das Simulationstool PHEM wird seit 1999 am Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme (ITnA) der TU Graz und der FVT GmbH entwickelt. Das Modell wird laufend in nationalen und internationalen Projekten weiterentwickelt, um neue Technologien abzubilden und die Anwenderfreundlichkeit sowie Genauigkeit zu verbessern. Das Modell wird unter

anderem zur Berechnung der Kfz-Basisemissionsfaktoren im HBEFA verwendet, z.B. in (Notter, 2021), (Matzer, 2020), (Hausberger, 2016), (Luz, 2013).

PHEM bestimmt den Energieverbrauch und bei Antrieben mit Verbrennungsmotoren auch die Abgasemissionen von Straßenfahrzeugen für beliebige Fahrzyklen auf Grundlage der Fahrzeuglängsdynamik. Der Motorleistungsbedarf wird dabei in sekündlich aus den Fahrwiderständen und Verlusten im Antriebsstrang berechnet. Die Motordrehzahl wird durch den Reifendurchmesser und das Übersetzungsverhältnis der Achse und des Getriebes sowie ein Schaltmodell bestimmt. Abgasemissionen und Energieverbrauch werden dann aus Motorkennfeldern interpoliert. Für die Schadstoffemissionen werden auch die Abgasnachbehandlung sowie Dynamikeffekte simuliert. Für elektrische Antriebe ist ein Batteriemodell enthalten, dass die Lade- und Entladeverluste im Fahrbetrieb aus Innenwiderstand, SOC abhängigen Spannungskurven und dem Leistungsbedarf berechnet. Der Leistungsbedarf der Nebenaggregate kann dabei mit dem Modell AuSim (Kapitel 2.1.5.2) im Pre-Processing berechnet und PHEM als Mittelwert je Zyklus oder auch zeitaufgelöst vorgegeben werden (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Schema des Simulationsmodells PHEM für Anwendung bei Elektrofahrzeugen



Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

2.1.5.2 AuSim

Das Modellpaket AuSim (Auxiliary Simulator) dient insbesondere zur Abschätzung des Energiebedarfes für Heizung, Kühlung und Belüftung (HVAC) von Kfz als Funktion von Umgebungsbedingungen und Fahrzeugparametern. Der Energieverbrauch weiterer Nebenaggregate wird anhand von Durchschnittsdaten aus dem PHEM Modellansatz für HBEFA 4.2 bestimmt. Dabei kann jeder Verbraucher unterschiedlich aktiviert werden (von Scheibenwischern und Beleuchtung bis zu Steuergeräten und Sensoren).

Die Grundlagen für das HVAC-Modell wurden im Rahmen der Entwicklung eines Testverfahrens für PKW-Klimaanlagen mit konventionellen Antrieben für die EU-Kommission erarbeitet (Hausberger, 2013). In (Lohnauer, 2019) wurde das Modell aktualisiert und verfeinert. Für das vorliegende Projekt wurde das Modell zur Berechnung rein elektrisch betriebener Kfz angepasst.

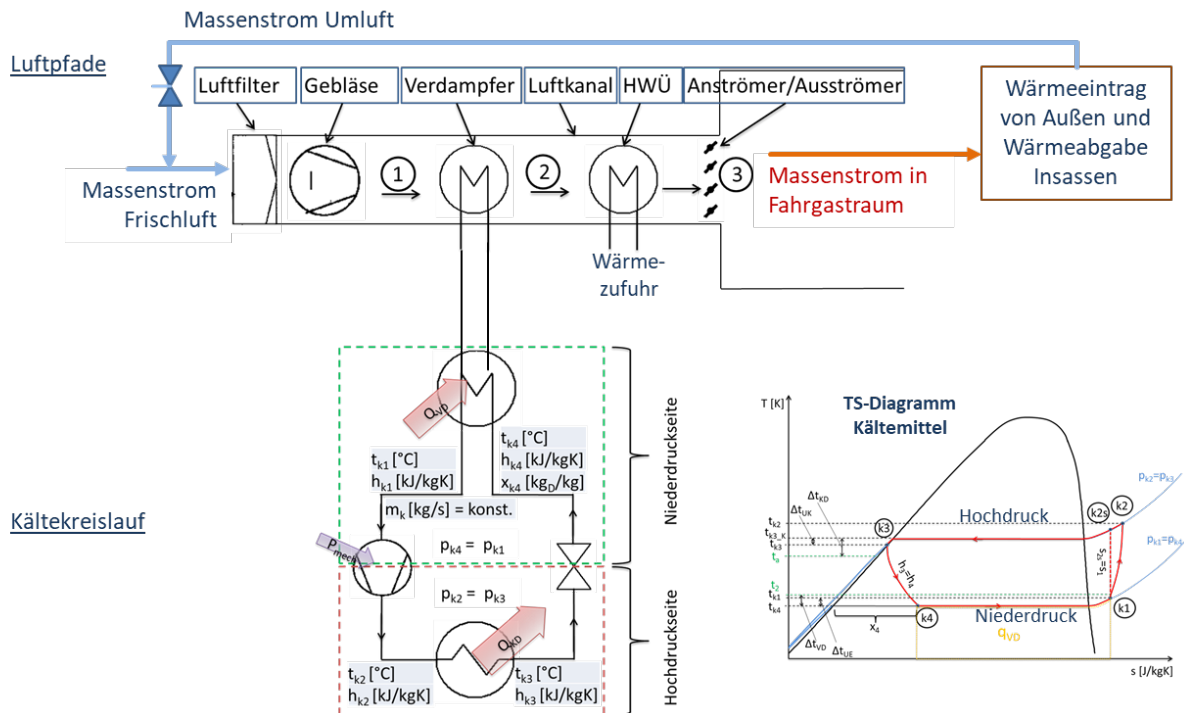
Das Simulationspaket für das HVAC-System führt folgende Berechnungen durch:

1. Der Energie-Ein- bzw. Austrag über die Fahrzeugoberfläche, insbesondere über die Verglasung, wird anhand der Sonnenstrahlungsintensität, der Temperaturen im Innenraum und der Umgebung, der Verglasungsdaten (Fläche, Einbauwinkel, Reflexions- und Transmissionskoeffizienten) und der Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet. Dafür wird die Energiebilanz aus Strahlung und konvektivem Wärmeübergang zwischen Umgebung und Fahrgastzelle aufgestellt. Das Fahrzeug bewegt sich dabei virtuell einmal um die Hochachse, um die unterschiedlichen Einstrahlwinkel und Flächen zu berücksichtigen.
2. Der Massenstrom und die Wunschtemperatur der Zuluft in den Fahrgastraum werden in Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung und der Umgebungstemperatur berechnet. Dabei wurde eine Klimaautomatik-Regelung angenommen, die den Massenstrom sowohl in Richtung niedriger (Heizen) als auch hoher (Kühlen) Umgebungstemperaturen erhöht. Die Wunschtemperatur am Austritt steigt mit sinkendem Wärmeeintrag durch die Scheiben. Der Energiebedarf des Lüftungsgebläses und des Klimakompressors sind direkt proportional zum Luftmassenstrom. Daher ist der Massenstrom eine wesentliche, aber unsichere Größe bei der Simulation des realen Betriebes. Die gewählten Funktionen beruhen auf Annahmen zum Verhalten der Klimaautomatik bzw. der bevorzugten Einstellungen durch die Insassen. Messdaten oder nutzbare Literatur zu Klimaautomatik Funktionen von PKW sind uns nicht bekannt. Das gesamte Modell wurde anhand der eigenen BEV-Messungen kalibriert und zeigt plausible Leistungsbedarfswerte.
3. Der Heiz- und Kühlbedarf wird aus den Zustandsgrößen der Zu- und Abluft (Pos. 1, 2 und 3 in Abbildung 2) über eine Energiebilanz berechnet. Der Energiebedarf ergibt sich aus der Differenz der Enthalpieströme am Eintritt (Umgebungsluft und zugeführte Umluft) und am jeweiligen Querschnitt. Bei Kühlung sind die Enthalpiedifferenz von Pos. 1 und 2 sowie die Temperatur am Verdampfer des Kältekreislaufes relevant als Eingabe für die zugehörige Routine (siehe Schritt (4)). Dabei erfolgt von Pos. 1 zu 2 eine Unterkühlung zur Trocknung der Luft und danach von Pos. 2 nach 3 eine Heizung auf Austrittszustand (Einströmdüsen in den Fahrgastraum). Im Fall eines reinen Heizbedarfes wird die nötige Heizleistung direkt aus der Differenz der Enthalpieströme am Eintritt (Pos. 1) und Austritt (Pos. 3) definiert. Die Heizung erfolgt soweit verfügbar durch Abwärme des Elektromotors, die Differenz zum Heizbedarf wird mittels Wärmepumpe gedeckt, solange sich eine Leistungszahl über eins ergibt, sonst rein elektrisch. Die Berechnung erfolgt für Frischluft, Umluft und beliebige Zwischenstellungen. Bei Umluft wird der Zustand der rückgeführten Luft aus dem Zustand der in den Fahrgastraum einströmenden Luft (Pos. 3) und den in Schritt (1) beschriebenen Wärmeeinträgen berechnet.
4. Der Energiebedarf für Heizen bzw. Kühlen aus Schritt (3) wird an das Klimaanlagenmodul übergeben. Dieses berechnet die Kompressorleistung aus dem thermodynamischen Kreisprozess des Kältemittels über Kondensator, Drosselung, Verdampfer und Kompressor. Dabei werden die Temperaturen so geführt, dass die Wärmeübergänge zwischen Kältemittel und der Fahrzeugzuluft bzw. der Umgebungsluft bei jeweils 5° bis 10°C Temperaturdifferenz in den Wärmetauschern erfolgen. Der relevante Energiebedarf für das Elektrofahrzeug ist die berechnete effektive elektrische Kompressorleistung.
5. Die gesamte elektrische Leistung wird aus der Summe der Gebläseleistung, der Kompressorleistung und der eventuell erforderlichen Elektroheizung berechnet.

Wenn nicht anders angegeben, wurde in dieser Arbeit jeweils mit 85 % Umluft gerechnet. Reiner Frischluftbetrieb führt bei hohen und bei niedrigen Temperaturen zu deutlich höherem Leistungsbedarf. Die eher geringen Unterschiede im Energieverbrauch der beiden Versuchsfahrzeuge bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen deuten auf eher geringe Leistungsanteile deren HVAC-Systems hin. Ohne Messung des Stroms direkt an den Komponenten kann die gesamte nachgeladene elektrische Energie nur mittels der Simulation

der Komponenten und des Gesamtfahrzeuges plausibel den einzelnen Komponenten zugeordnet werden, was natürlich erhebliche Unsicherheiten beinhaltet. Die Komponenten des HVAC-Systems sind typischerweise so verbaut, dass Messungen der Massenströme und auch der Energieflüsse erheblichen Aufwand erfordern.

Abbildung 2: Schema des Simulationsmodells AuSym zur Abschätzung des Leistungsbedarfes des HVAC-Systems



Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

2.2 Auswertung der vorhandenen Verbrauchsdaten

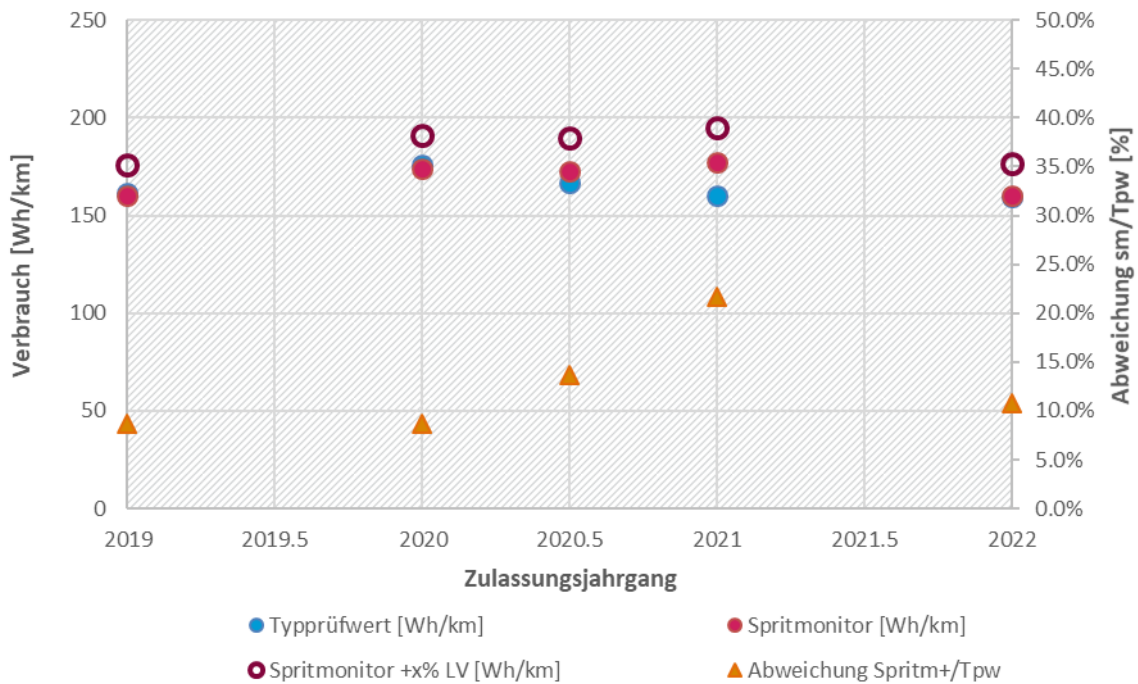
2.2.1 Vergleich Realverbrauchsdaten mit Herstellerangaben

Abbildung 3 zeigt die mittleren Einträge in spiritmonitor.de für den Energieverbrauch der Elektro-PKW für die Zulassungsjahrgänge 2019 bis 2022 im Vergleich zu den durchschnittlichen Typprüfdaten. Beide Datensätze wurden nach der Anzahl der Einträge in spiritmonitor.de gewichtet. Da Sonderausstattungen und Batteriegröße die Fahrzeugmasse und damit den Typprüfverbrauch beeinflussen, besteht in der Zuordnung der Typprüfwerte zu den Angaben in spiritmonitor.de eine Unsicherheit. In den KBA Typprüfdaten ist die mittlere Abweichung zwischen der Modellausführung mit geringstem und höchstem Typprüfverbrauch 8,4 %, die Unsicherheit (95 % Vertrauensintervall) der zugeordneten Typprüfdaten sollte daher unter +/- 3,5 % liegen.

Relevant ist die Unsicherheit der Ladeverluste. Diese sind vermutlich teilweise in den spiritmonitor.de Daten nicht enthalten, jedoch in den Typprüfwerten. Bei den Typprüfwerten wurde aber vermutlich die Ladevariante mit den geringsten Verlusten gewählt.

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, haben wir für die Einträge in spiritmonitor.de etwa gleiche Anteile an Einträgen mit und ohne Ladeverluste angenommen. Unter dieser Annahme wurde im Mittel für Einträge in Spiritmonitor.de ein Aufschlag von 10 % eingerechnet. Mit dieser Annahme, liegen die nachgeladenen Realverbräuche der Spiritmonitor.de Einträge etwa 14 % über den Typprüfwerten.

Abbildung 3: Mittlere Einträge zum Energieverbrauch von Elektro PKW in spritmonitor.de, korrigierte Werte auf nachgeladenen Realverbrauch „+10 % LV“ und mittlere Typprüfdaten (auch nachgeladener Verbrauch)



Spritmonitor +x % LV.... Einträge in Spritmonitor um 10 % erhöht um vermutlich teilweise nicht erfasste Ladeverluste zu berücksichtigen

Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

Tabelle 1 fasst die mittleren Daten zusammen. Nennleistung, Reichweite und Typprüfwerte stammen dabei aus den KBA Typprüfdaten und wurden von uns den Modellen in spritmonitor.de zugeordnet.

Tabelle 1: Mittlere Einträge zum Energieverbrauch von Elektro PKW in spritmonitor.de (vermutlich angezeigter Verbrauch) und mittlere Typprüfdaten (nachgeladener Verbrauch)

Zulassungs-Jahrgang	# Einträge in Spritmonitor.de	Nennleistung [kW]	Reichweite ⁽¹⁾ [km]	Verbrauch ⁽¹⁾ [Wh/km]	Spritmonitor +10 % Ladeverl. [Wh/km]
Mittelw. alle	4137	123	305	167	191
2019	46	123	311	162	176
2020	208	99	327	176	192
2021	617	107	344	160	198
2022	187	123	378	159	183

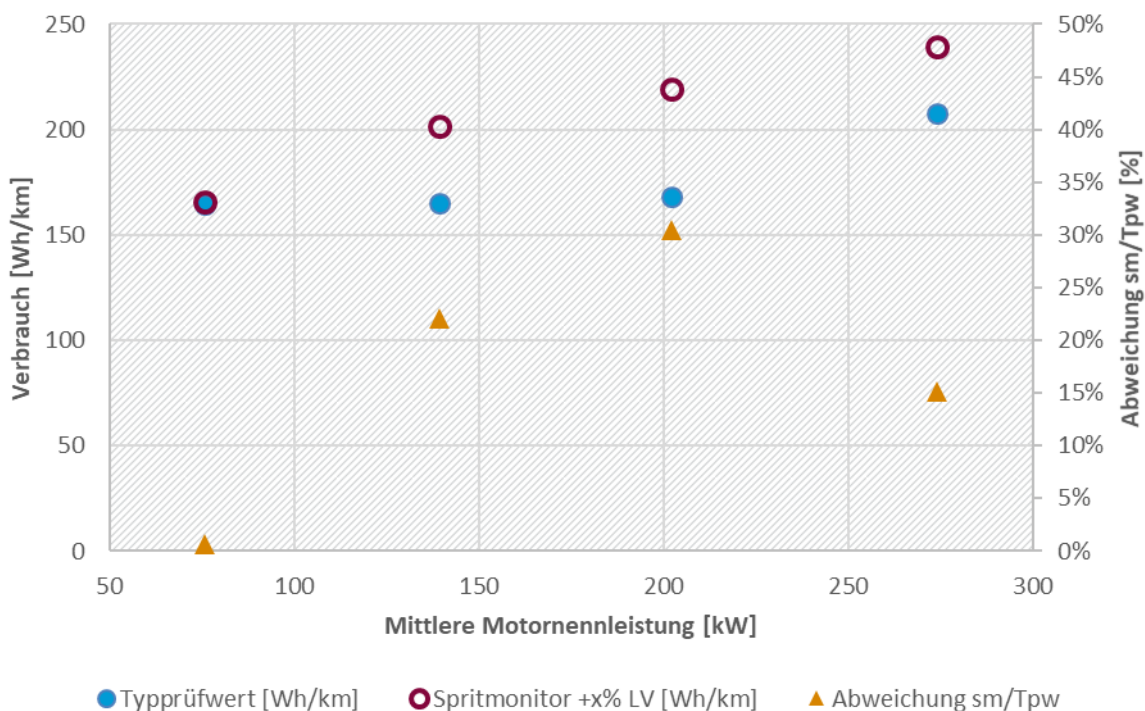
(1) aus Typprüfdaten

Abbildung 4 zeigt dieselben Daten, jedoch klassifiziert nach Nennleistungsklassen (unter 100 kW, 100-150 kW, 151 bis 250 kW und über 250 kW). Tendenziell ist mit steigender Leistung eine deutliche Zunahme der Abweichung zwischen spritmonitor.de-Eintrag und Typprüfverbrauch zu erkennen. Nur die Klasse über 250 kW schert aus dem Trend aus. In dieser

Klasse sind aber auch nur 209 Einträge aus [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de) nach den zuvor beschriebenen Filtern verblieben.

Der Trend zu steigendem Verbrauch mit steigender Nennleistung ist im Mittel bei allen Leistungsklassen in den Daten aus [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de) zu sehen. In den Typprüfdaten nimmt der Verbrauch dagegen erst in der Klasse über 250 kW signifikant zu. Dies würde nahelegen, dass der steigende Realverbrauch bis 250 kW vorwiegend aus einem, mit zunehmender Nennleistung aggressiveren Fahrverhalten stammt. Die Fahrzeug-Leermassen und Stirnflächen sind weder im Datensatz von KBA noch in [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de) enthalten. Eventuell nehmen diese Werte im Flottendurchschnitt erst bei hohen Nennleistungen signifikant zu. Andernfalls müsste man auch in den Typprüf-Verbrauchswerten eine mit zunehmender Nennleistung steigende Tendenz erkennen.

Abbildung 4: Realverbrauch nach [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de) und Typprüfverbrauch nach Leistungsklassen

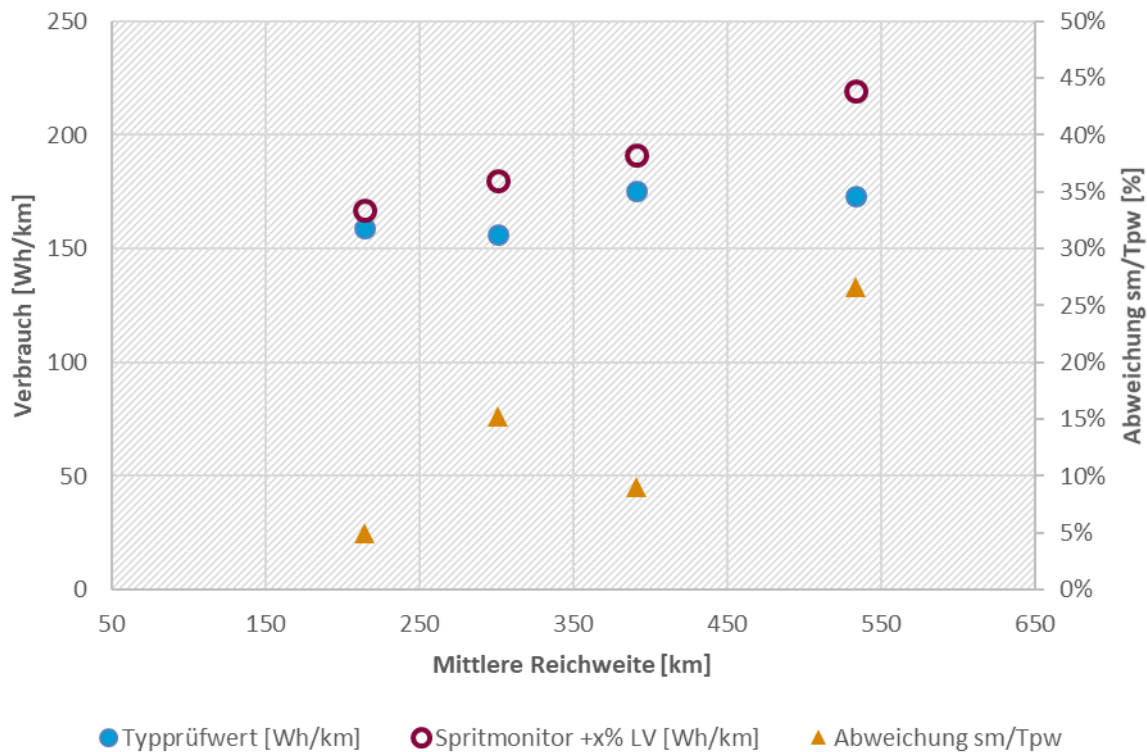


Spritmonitor +x % LV.... Einträge in [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de) um 10 % erhöht, um vermutlich teilweise nicht erfasste Ladeverluste zu berücksichtigen

Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

Die mittlere Reichweite der BEV ist, gewichtet nach Modellanteilen in [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de), von 311 km im Zulassungsjahr 2019 auf 380 km für die bisher im Jahr 2022 zugelassenen Elektro-PKW gestiegen. Trotz steigender Energiedichten der Batterien dürfte das jeweils auch das Fahrzeuggewicht und damit tendenziell auch den Energieverbrauch erhöhen. Im gleichen Zeitraum haben die gewichteten Fahrzeugnennleistungen nicht zugenommen. Abbildung 5 zeigt den Realverbrauch aus [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de) (korrigiert auf nachgeladene Energie) und Typprüfdaten über Reichweitenklassen. Die meisten BEV haben 350-450 km Reichweite (1.268 eingetragene Kfz in [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de)) die wenigsten unter 250 km (530 eingetragene Kfz in [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de)). Es ist wieder ein signifikanter und etwa linearer Anstieg der Real-Verbräuche mit steigender Reichweite zu erkennen. In den Typprüfdaten ist eher ein sprunghafter Anstieg bei 350 km zu sehen.

Abbildung 5: Realverbrauch nach spiritmonitor.de und Typprüfverbrauchswerte nach Reichweitenklassen



Spiritmonitor x % LV.... Einträge in spiritmonitor.de um 10 % erhöht um vermutlich teilweise nicht erfasste Ladeverluste zu berücksichtigen

Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

Insgesamt beinhaltet der Vergleich der Typprüfdaten mit spiritmonitor.de einige Unsicherheiten und es lassen sich keine sicheren Trends zu Abweichungen feststellen. Im Mittel dürfte die Abweichung zwischen Real- und WLTP-Verbrauch bei etwa 15 % liegen. Je nachdem, wie die realen Ladeverluste tatsächlich in den spiritmonitor.de Daten enthalten sind, ist auch eine bis zu ca. 10 %-Punkten kleinere oder größere Abweichung möglich.

Für insgesamt 16 Modelle stehen Einträge sowohl vom ADAC Ecotest als auch aus spiritmonitor.de zur Verfügung. Für die beiden an der TU Graz vermessenen Fahrzeuge stehen zusätzlich gemessene Realverbrauchswerte und die Typprüfwerte zur Verfügung. Der ADAC Ecotest wurde für diese Kfz simuliert (siehe Kapitel 2.2.3).

Zum Vergleich in Abbildung 6 wurden folgende Werte verwendet:

Spiritmonitor.de: Der Realverbrauch wurde aus den jeweiligen Einträgen nach Marken und Typen entnommen und die 10 % zur Berücksichtigung vermutlich nicht erfasster Ladeverluste aufgeschlagen. Die Typprüfdaten wurden wieder aus dem KBA Datensatz zugeordnet. Die Mittelwerte stellen jeweils gewichtete Mittelwerte nach eingetragenen Kfz in spiritmonitor.de für die 16 PKW dar, für die auch ADAC Daten vorliegen.

ADAC Ecotest: Die dort angegebenen „Herstellerangaben WLTP“ wurden als Typprüfwert verwendet, die Angaben zum Ecotest wie eingetragen. Die Daten wurden ebenfalls jeweils als gewichtete Mittelwerte nach eingetragenen Kfz in

spritmonitor.de für die 16 PKW verwendet, für die auch spritmonitor.de Daten vorliegen.

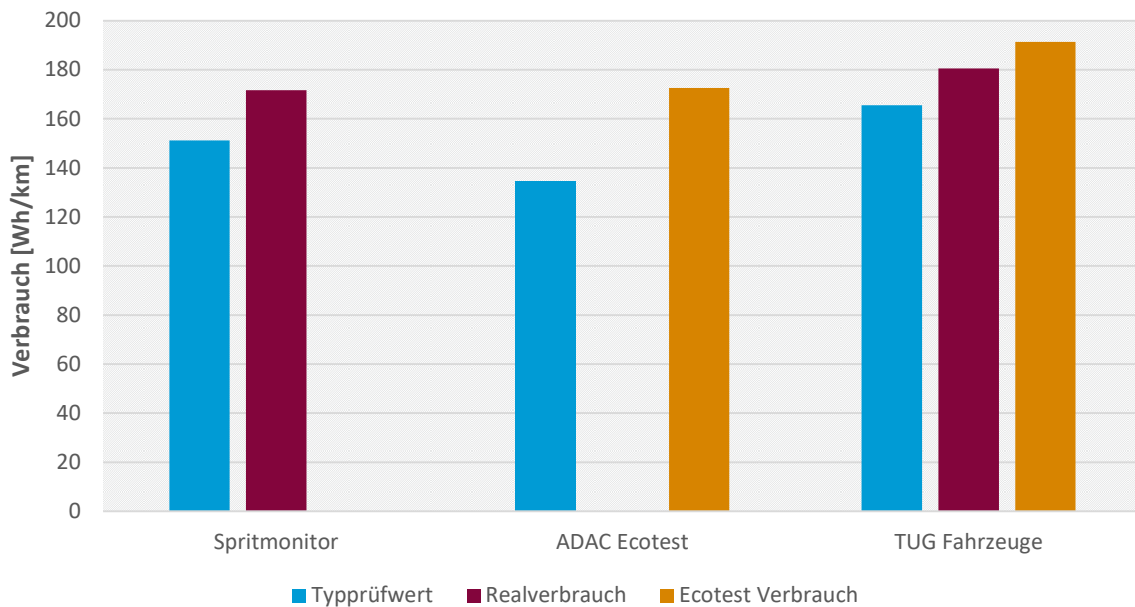
TUG Fahrzeuge: Die Werte sind jeweils der Mittelwert für VW ID.3 und Renault Zoe. Als Realverbrauch wurde der Mittelwert der „Ries-RDE-Fahrten“ verwendet. Diese Strecke stellt die Standard-RDE Runde der TU Graz dar. Der Typprüfwert ist der Mittelwert für die beiden Kfz, ebenso das Simulationsergebnis zum ADAC Ecotest. Wegen der anderen Stichprobe, sind die Absolutwerte der TUG-Fahrzeuge nicht direkt mit den anderen Datensätzen vergleichbar.

Wir ziehen aus dem Vergleich folgende Schlüsse:

- ▶ Für dieses Sub-Sample liegen die Einträge in spritmonitor.de um 3 % über den Typprüfwerten. Wenn wir wieder die 10 % Aufschlag für vermutlich nicht enthaltene Ladeverluste ansetzen, ergeben sich wieder fast 15 % Mehrverbrauch zum WLTP-Wert.
- ▶ Die Typprüfwerte sind für das selbe Fahrzeugsample im Ecotest Datensatz im Mittel um 11 % niedriger als im KBA Datensatz. Diese Abweichung ist größer als die Abweichung in den KBA Daten von Minimal- zu mittleren Verbrauchsangaben des Samples von 3 %. Die Ursache der Abweichung ist unklar.
- ▶ Der Ecotest ergibt im ADAC Datensatz einen im Vergleich zur Herstellerangabe um 28 % höheren Verbrauch. Nehmen wir für den ADAC Datensatz die Typprüfwerte aus den KBA Werten anstelle der im ADAC angegebenen Herstellerangaben, so ergeben sich 14 % Mehrverbrauch im Ecotest. Für die beiden TUG Fahrzeuge haben wir +16 % im (simulierten) Ecotest gegenüber dem Typprüfwert berechnet. Der gegenüber WLTP höhere Verbrauch im Ecotest ergibt sich aus der höheren Zuladung und dem an den WLTC angehängten BAB Teil.
- ▶ Der TUG Datensatz ergibt für den „Ries-RDE-Realverbrauch“ einen gegenüber WLTC etwa 10 % höheren Verbrauch. Die Tests an der TUG wurden im Sommer bei mehrheitlich gemäßigten Temperaturen durchgeführt. Zudem ist der Ries-RDE-Test ca. 90 km lang, womit eventuelle Kaltstarteffekte ein viel geringeres Gewicht haben als im realen Betrieb. Im Jahresmittel, und umgelegt auf nur ca. 25 km mittlere Fahrstrecke würde sich wahrscheinlich ein höherer Verbrauch ergeben³. Die mittleren Strecken im spritmonitor.de Datensatz dürften auch deutlich kürzer als 90 km sein, wenn sie durchschnittliches Verhalten repräsentieren. Zusammen mit den in Österreich geringeren Maximalgeschwindigkeiten auf der Autobahn können so die Unterschiede zum Realverbrauch im spritmonitor.de Datensatz, für den wir ca. 14 % Mehrverbrauch ausgewertet haben, erklärt werden. Ein Teil der Differenz könnte aber auch aus einer Überschätzung der in spritmonitor.de nicht enthaltenen Ladeverluste stammen.

³ Der Einfluss extremerer Temperaturen auf HVAC-Energiebedarf und auch auf den Luftwiderstand ist in Kapitel 4 im Bericht beschrieben.

Abbildung 6: Vergleich unterschiedliche Verbrauchsangaben zu einem Sample aus 16 gleichen BEV-PKW Modellen aus den Daten von spritmonitor.de und ADAC sowie für 2 Modelle aus TU Graz Tests



Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

2.2.2 Quervergleich zu konventionell betriebenen PKW

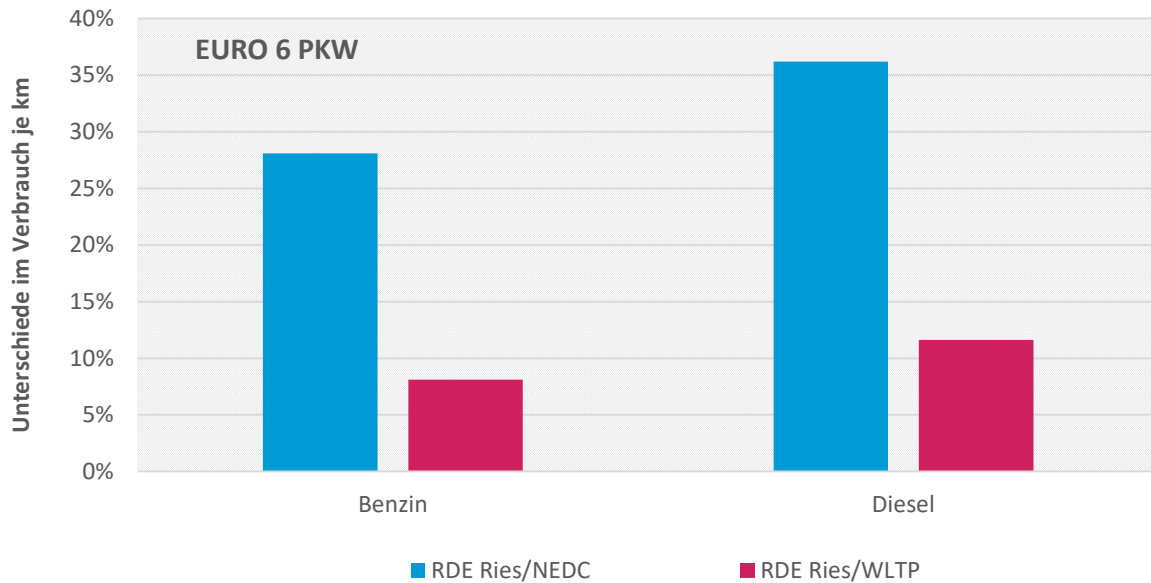
In (Eisenmann, 2019) wurden Abweichungen des Realverbrauchs konventioneller PKW und LNF zu den Typprüfwerten untersucht. Diese bezogen sich damals allerdings noch auf den NEDC. Um auch einen Bezug zum WLTP-Typprüfergebnis herstellen zu können, wurden aktuelle Messdaten der FVT und TUG aus einem Projekt für das UBA Deutschland (Weller, 2021) bezüglich der Abweichung der Messergebnisse im RDE Ries Test zu den Typprüfwerten ausgewertet. Es wurden Daten von 16 Diesel PKW und 10 Benzin PKW der Klassen EURO 6a bis EURO 6d verwendet. Für diese Datensätze standen für alle PKW die NEDC-Werte zur Verfügung, die WLTP-Werte nur für die neueren Zulassungen, insgesamt für 11 Benzin und 7 Diesel PKW.

Die Abweichungen zwischen RDE-Ries-Test und WLTP betrugen im Mittel 8 % für Benzin und 12 % für die Diesel-PKW (siehe Abbildung 7). Diese Abweichungen sind im Bereich der 10 % Abweichung, die wir für die beiden Elektro-PKW, ebenfalls für RDE-Riestest zu WLTP gefunden haben. Sowohl bei konventionellen als auch bei Elektro-PKW sind im WLTP weniger NAE-Verbraucher aktiv als im mittleren, realen Betrieb und der Testzyklus könnte die Dynamik und Maximalgeschwindigkeiten der mittleren realen Fahrten, speziell für Deutschland, unterschätzen, was auch zu einer Unterschätzung des Realverbrauchs führt.

Elektrofahrzeuge benötigen bei niedrigen Temperaturen auch Heizenergie aus der Batterie für die Konditionierung des Fahrgastraums und auch die Batterie dürfte oft in den ersten Minuten vorgeheizt werden, um ausreichende Leistungsabgabe zu ermöglichen (siehe Kapitel 2.2.3.1). Bei einem Test bei 23 C wie im WLTP sind diese Energien dagegen nicht erforderlich. Konventionelle PKW können für diesen Heizbedarf die Motorabwärme nutzen. Das würde speziell für kürzere Strecken als die 90 km lange Ries-RDE Runde ein etwas höheres Verhältnis von Realverbrauch zu WLTP-Ergebnis bei Elektrofahrzeugen als bei konventionellen PKW erklären. Damit erscheinen die +14 % Realverbrauch zu WLTP, wie wir es aus den

spritmonitor.de Daten abgeleitet haben, gegenüber den +10 % aus den Ries-RDE Runden plausibel.

Abbildung 7: Vergleich Realverbrauch konventioneller EURO 6 PKW, gemessen im „Ries-RDE-Test“ an der TU Graz zu den Herstellerangaben nach NEDC und nach WLTP



Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

2.2.3 Vergleich Simulation und Messung zu Real- und Typprüfverbrauch

Um die Modelldaten für die Simulation von BEV in PHEM abzusichern und die Einflüsse von Nebenverbrauchern und instationären Heiz- und Kühlaufwänden zu quantifizieren, wurde auch ein Vergleich von Simulation und Messung zu Real- und Typprüfverbrauch durchgeführt.

Dazu haben wir die Messungen, die wir am Volkswagen ID.3 und Renault Zoe durchgeführt haben, mit dem Modell PHEM simuliert. Die Fahrzeugmassen, Nennleistungen und Batteriekapazitäten sowie die Fahrwiderstände haben wir für die Simulation entsprechend der Herstellerangaben angenommen. Das Batteriemodell wurde nicht geändert, da die Lade- und Entladeverluste während der Fahrt gering sind. Die Verluste in der Leistungselektronik sind jeweils im Motorkennfeld berücksichtigt. Für den Elektromotor haben wir ein generisches Elektromotor-Kennfeld so kalibriert, dass der Energieverbrauch in den Messungen am ID.3 und Renault Zoe, in den Fahrten mit geringem NAE-Verbrauch (HVAC ausgeschaltet, auch sonst keine relevanten Verbraucher aktiv) gut nachgebildet werden kann. Für beide PKW konnte mit demselben Kennfeld ausreichend genau gerechnet werden.

Mit dem Modell AuSim haben wir dann die NAE-Leistungen für die jeweils gewählten HVAC -Settings und Umgebungszustände der einzelnen Testfahrten berechnet und in der Simulation mit PHEM für jeden Zyklus entsprechend der AuSim Ergebnisse eingesetzt. Weiterhin haben wir noch den Energiebedarf zur Batteriekonditionierung nach Kaltstarts bei sehr niedrigen Temperaturen und zur raschen, instationären Kühlung oder Heizung des Fahrgastraumes berechnet und zu dem mit PHEM simulierten Verbrauch addiert.

2.2.3.1 Start-Batteriekonditionierung

Die Batteriespannung und damit die maximale Leistung nimmt bei niedrigen Temperaturen deutlich ab. Daher dürfte bei einem uns unbekannten Anteil an Elektrofahrzeugen nach Starts

mit niedriger Batterietemperatur eine elektrische Heizung der Zellen über das Kühlmedium erfolgen. Durch die schnellere Erwärmung steht früher die volle Leistung für Fahren und auch für Rekuperation von Bremsenergie zur Verfügung. Betrieb bei niedrigen Temperaturen kann auch die Lebensdauer der Batterie reduzieren. Welcher Anteil der BEV in welchem Umfang Heizmaßnahmen für die Batterie einsetzt, konnte bislang nicht eruiert werden.

Daten aus einer Testfahrt mit einem VW ID.3, die vom technischen Büro Blassnegger zur Verfügung gestellt wurden, enthalten auch den Strombedarf für das Batterie-Heizen aus dem CAN-Signal. Das Signal ergibt eine Gesamtenergie von ca. 730 Wh für das Batteriekonditionieren. Gestartet wurde die Testfahrt bei einer Umgebungstemperatur von ca. 4,5°C. Die Fahrt dauerte ungefähr 36 Minuten bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von ca. 47 km/h, das Batterie-Heizen war nach ca. 900 Sekunden beendet.

Über die Masse der Batterie, Außentemperatur und Zieltemperatur für die Batterie und der spezifischen Wärmekapazität kann die notwendige Energie für die Batteriekonditionierung über eine Energiebilanz gerechnet werden:

$$E_{Bat-kond} [Wh] = m_{Bat} * (T_{Ziel} - T_{Start}) * c_{Bat}$$

Mit

$E_{Bat-kond}$ Elektrischer Energieverbrauch zur Heizung der Batteriezellen nach Kaltstart [Wh]

m_{Bat} Zu heizende Masse der Batterie für die Konditionierung in kg

T_{Ziel} Zieltemperatur auf die, die Batterie geheizt werden soll in °K

T_{Start} Starttemperatur der Batterie zu Beginn der Konditionierung in °K

c_{Bat} Spezifische Wärmekapazität der Batterie in Wh/kgK

In der Literatur findet man nur wenige Informationen zur spezifischen Wärmekapazitäten von Hochvoltbatterien, die zwischen 0.19 – 0.22 Wh/kgK liegen⁴. Mit einer Batteriemasse von 385 kg für das Testfahrzeug, ergibt sich aus obiger Gleichung damit aber eine deutlich höhere Heizenergie (mindestens 1.200 Wh). Vermutlich werden also nur die Zellen geheizt und/oder die Temperatursonde des Kfz liegt nahe an einem Heizelement. Schätzt man den Masseanteil der zentralen Zellenstruktur mit Daten zu Li-Ion Batteriekomponenten von PKW nach (Aichberger C., Jungmeier G., 2020) ab, so ergeben sich für die Zellen ca. 70 % der Batteriemasse. Mit dieser Masse und einer gemessenen Heizenergie von 730 Wh aus der Testfahrt mit dem VW ID.3, ergibt sich eine spezifische Wärmekapazität c_{Bat} von 0,17 Wh / (kg*K)

Mit der einen Messung und wenig verwertbaren Literaturangaben, stehen derzeit noch nicht ausreichend Daten zur Verfügung, um den Energiebedarf zur Batteriekonditionierung verlässlich quantifizieren zu können. Der Abgleich mit den Tests im Renault Zoe und VW ID.3, die bei 0°C Vorkonditionierung gefahren wurden, führt zu folgender Näherungsgleichung, die wir im Weiteren für Fahrten, die unter 15°C beginnen, anwenden:

$$E_{Bat-kond} [Wh] = 0.9 \times EB \times (15 - t_{start})$$

$$P_{Bat-kond} [W] = 4 \times E_{Bat-kond}$$

(für eine Heizdauer von 900 Sekunden)

Mit

$E_{Bat-kond}$ Elektrischer Energieverbrauch zur Heizung der Batteriezellen nach Kaltstart [Wh]

⁴ <https://lionknowledge.com>

$P_{\text{Bat-kond}}$ Mittlere elektrische Leistung zur Heizung der Batteriezellen nach Kaltstart [W]

EB.....Energieinhalt der Batterie [kWh]

t_{start}Temperatur der Batterie beim Start [°C]

Für einen Start bei 0°C und einer Batteriegröße von 50 kWh ergibt sich ein Energieverbrauch von 473 Wh mit einer Leistung von ca. 1,9 kW über eine Viertelstunde. Der Energieverbrauch ist also mit der Näherungsformel geringer als oben mit den 730 Wh für 5 bis 20°C Konditionierung aus dem CAN-Signal ermittelt. Welcher Wert näher an einem Flottenmittelwert liegt, ist unbekannt.

Der Verbrauch zur Batteriekonditionierung ist naturgemäß je Kilometer Strecke umso höher, je kürzer die Strecke ist. Bei 5 km Fahrt ergeben sich fast 95 Wh/km, bei 25 km nur mehr 19 Wh/km Zusatzverbrauch für erstmaliges Batterie heizen. Dieser Zusatzverbrauch ist im WLTP nicht erfasst, da für BEV keine Starts unter 20°C gemessen werden.

Vermutlich gibt es auch BEV ohne aktive Batteriekonditionierung. Zumindest wird von Nutzern einiger Fahrzeugtypen berichtet, dass die volle Rekuperationsleistung im Winter lange nicht verfügbar ist. Die Lade- und Entladeverluste von großen Batterien sind bei den im Mittel eher geringen entnommenen Leistungen niedrig und führen nur zu einer langsamen Erwärmung. Nimmt man 1 % Verlust in der Batterie durch Innenwiderstände bei 10 kW durchschnittlicher Leistung an, so ergeben sich nur 100 W Wärmeeintrag in die Zellen, was pro Stunde für eine 50 kWh Batterie nach o.a. spezifischen Wärmen nur etwa 2°C Temperaturerhöhung bedeuten würde.

2.2.3.2 Start-Fahrgastraumkonditionierung

Bei Starts mit einer anderen Temperatur des Fahrgastraumes als der Wunschtemperatur, wird Energie zwischen Fahrzeug und der Luft im Innenraum übertragen. Dieser Vorgang ist instationär und endet, wenn Temperaturgleichgewicht herrscht. Bei moderaten Temperaturunterschieden ist anzunehmen, dass die Klimaautomatik keine speziellen Heiz- oder Kühleingriffe vornimmt, da sich das Gleichgewicht schnell genug durch die Zuluft und im Fall von Heizbedarf aus Abwärme von Antrieb und Insassen einstellt. Bei sehr kalten oder heißen Starts dürfte ein extra Energieaufwand für ein initiales Heizen oder Kühlen üblich sein. Damit kann ein höherer Zuluft-Massenstrom mit niedrigerer (Kühlen) oder höherer (Heizen) Temperatur als im stationären Betrieb erzeugt werden.

Für die Abschätzung des initialen Heizbedarfes wurden uns vom Technischen Büro Blassnegger Daten aus einer Messung an einem Volkswagen ID.3 einer Testfahrt mit Startvorgang bei 5°C Starttemperatur zur Verfügung gestellt. Diese wurden aus den CAN-Bus Daten aufgezeichnet. Der initiale Energieaufwand ergibt sich aus der Differenz zu Fahrtbeginn und dem stationären Heizbedarf. Die Auswertung des Tests führt zu folgender Näherungsgleichung:

$$E_{\text{Fgr-kond}} [\text{Wh}] = 2.1 \times (20 - t_{\text{start}})$$

$$P_{\text{Fgr-kond}} [\text{W}] = 12 \times E_{\text{Fgr-kond}}$$

(für eine Heizdauer von 300 Sekunden)

Mit

$E_{\text{Fgr-kond}}$ Elektrischer Energieverbrauch zur Heizung Fahrgastraum nach Kaltstart [Wh]

$P_{\text{Fgr-kond}}$ Mittlere elektrische Leistung zur Heizung Fahrgastraum nach Kaltstart [W]

EB.....Energieinhalt der Batterie [kWh]

t_{start}Temperatur der Batterie beim Start [°C]

Nach 300 Sekunden verwenden wir die stationäre Heiz- bzw. Kühlleistung, die wir aus dem Modell AuSim für den Umgebungszustand berechnen. Der instationäre, initiale Energiebedarf zur Fahrgastraumkonditionierung dürfte demnach eher gering sein. Bei 0°C ergeben sich 42 Wh bzw. knapp 500 W Leistungsbedarf über 5 Minuten.

Zur Überprüfung des Berechnungsansatzes für stationären und initialen Kühlbedarfs haben wir die beiden Testfahrzeuge im Stand für eine Stunde gemessen. Einmal wurden die Kfz davor in der Sonne bei etwa 32°C Außentemperatur geparkt und einmal im Schatten, bei ca. 30°C.

Die initiale, instationäre Temperierung würde nach obiger Gleichung nur etwa 21 Wh benötigen, also 0,021 kW gemittelt über eine Stunde Test. Die mit AuSim berechnete, stationäre Leistungsaufnahme der Nebenaggregate ist deutlich höher. Wir haben neben dem HVAC-System noch laufende Steuergeräte und sicherheitsrelevante Sensoren bei eingeschalteter Zündung unterstellt. Tabelle 2 vergleicht die nachgeladene Energie mit dem Simulationsergebnis. Wenn wir die mittleren Ladeverluste von ca. 12 % beim ID.3 und 21 % beim Zoe unterstellen, trifft die Simulation die Messwerte im Rahmen der Unsicherheiten. Sowohl lokale Sonneneinstrahlung als auch die Massenströme an Frisch- und Umluft im Klimasystem konnten nicht gemessen werden.

Tabelle 2: Vergleich von gemessenem und simuliertem NAE-Verbrauch bei Fahrzeugstillstand

Test	Kfz	Leistung aus geladenen kWh ⁽¹⁾	Simuliert Klimatisierung	Simuliert Summe NAE
		[kW]		
30°C, Schatten	ID.3	1.8	1.1	1.5
31°C, Sonne, 30 % Umluft	ID.3	2.7	2.3	2.4
30°C, Schatten	Zoe	1.0	0.5	0.9
32°C, Sonne, 75 % Umluft	Zoe	2.1	1.2	1.6

(1) Bei einer Stunde Test entsprechen die nachgeladenen kWh der mittleren Leistung im Test

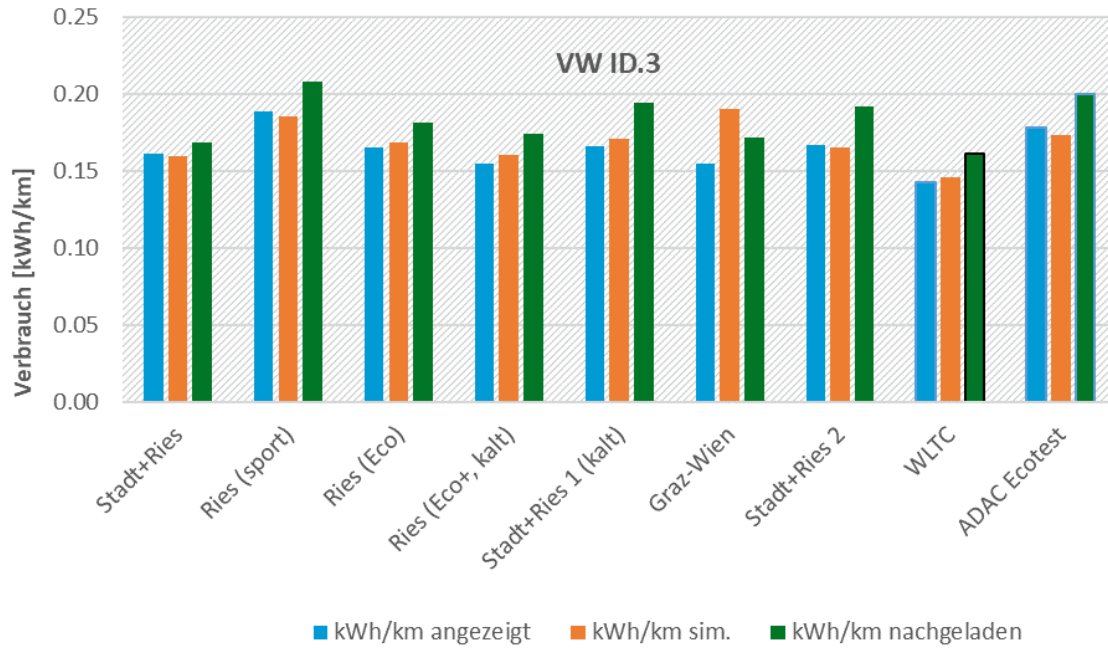
2.2.3.3 Gesamter Energieverbrauch

Der gesamte Energieverbrauch steht aus den nachgeladenen kWh und der dazugehörigen Strecke und aus der Fahrzeuganzeige als Messwerte zur Verfügung. Die damit berechneten Ladeverluste sind in Kapitel 483.3.3 analysiert. Die Messwerte werden mit dem gesamten, ohne Ladeverluste simulierten Energieverbrauch verglichen. Wie zuvor beschrieben, setzt sich der Verbrauch aus Antriebsenergie und dem Verbrauch aller NAE-Verbraucher inklusive initialer Konditionierungen zusammen.

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen die Ergebnisse für den Volkswagen ID.3 und den Renault Zoe. Der Wert „kWh/km nachgeladen“ für den WLTC entspricht dabei dem Typprüfwert, „kWh/km nachgeladen“ für den ADAC Ecotest der Angabe auf der ADAC Webseite zum Ecotest. Die verbrauchten, also „angezeigten“ Energiemengen wurden mit den mittleren gemessenen Ladeverlusten der jeweiligen Kfz berechnet. Mit Ausnahme der Fahrt Wien-Graz mit dem ID.3 werden alle Messwerte mit dem Simulationsmodell und den Standarddaten für Fahrzeuge, Batterie und Elektromotor gut getroffen. Die Ursache für die Überschätzung des gemessenen Verbrauches bei der Fahrt Graz-Wien ist unklar, die Nebenverbraucher sind bei den Autobahngeschwindigkeiten und der langen Strecke der Simulation für weniger als 4 % des

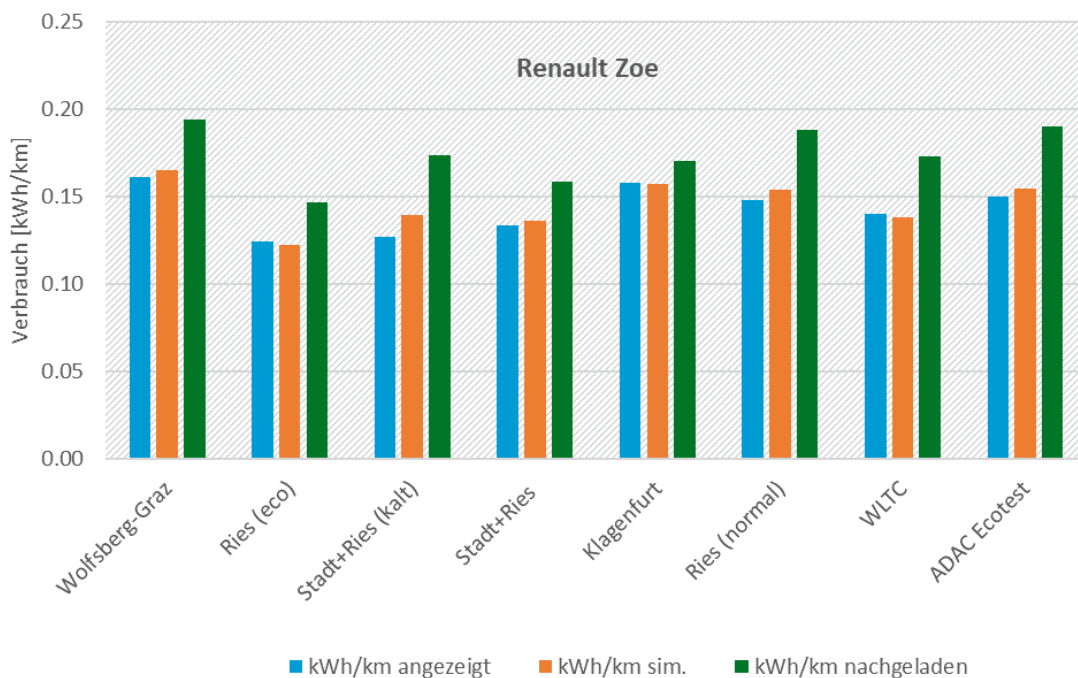
Gesamtverbrauches verantwortlich, der angezeigte Verbrauch wurde in dieser Fahrt um 23 % überschätzt.

Abbildung 8: Vergleich Realverbrauch gemessen an der TU Graz, Angaben zu Typprüfwerten und ADAC Ecotest Ergebnis mit Simulationsergebnissen für Volkswagen ID.3



Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

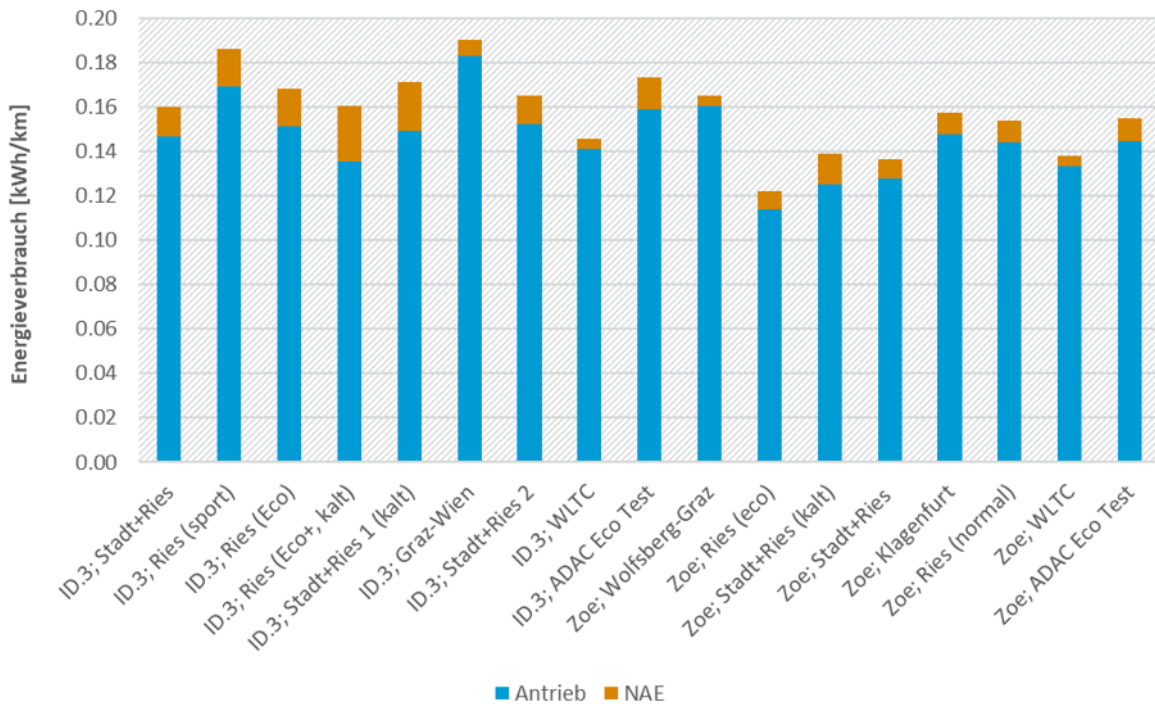
Abbildung 9: Vergleich Realverbrauch gemessen an der TUG, Angaben zu Typprüfwerten und ADAC Ecotest Ergebnis mit Simulationsergebnissen für Renault Zoe



Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

Abbildung 10 zeigt die berechneten Anteile der NAE an den simulierten Verbrauchswerten. Diese liegen zwischen 3 % für lange Autobahnstrecken und 15 % bei den mit 0°C vorkonditionierten Fahrten, die danach bei sommerlichen Temperaturen auf der ca. 90 km langen RDE-Ries Strecke erfolgten. Wie zuvor beschrieben, steigt der instationäre Anteil bei kürzeren Strecken mit kaltem Start vermutlich weiter an. Im WLTC wurden 3,3 % NAE-Anteil berechnet.

Abbildung 10: Berechnete Anteile der NAE an den simulierten Verbrauchswerten



Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

3 Daten zum Verbrauch von Nicht-Antriebs-Energie (NAE)

In diesem Kapitel werden nun verfügbare Daten zum NAE-Verbrauch (siehe Kapitel 3.1) analysiert, zunächst in Bezug auf den Gesamtenergieverbrauch der Elektrofahrzeuge (Kapitel 3.2) und anschließend für besonders relevante NAE-Verbraucher detailliert in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen (Kapitel 3.3). Abschließend werden mögliche Entwicklungspotentiale wichtiger NAE-Verbraucher aufgezeigt (Kapitel 3.4).

3.1 Vorgehen und Datenlage

Um aktuelle Verbrauchsdaten der NAE-Verbraucher zu ermitteln, wurde zum einen eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Zusätzlich konnten wir auf von der TU Graz durchgeführte Verbrauchsmessungen aktueller Fahrzeugmodellen auf der Straße zurückgreifen. Weiterhin standen uns für die Klimatisierung Simulationswerte des Klimaanlagenmodells der TU Graz zur Verfügung (siehe Kapitel 2.1.5.2). Die Daten wurden anschließend in einer Datenbank gesammelt und für die Auswertungen aufbereitet.

Die Literaturrecherche wurde anhand einer gezielten Schlagwortsuche durchgeführt. Dabei wurden aktuelle Studien, Berichte zu Realverbräuchen, Fachliteratur, technische Datenblätter und Ankündigungen der Fahrzeug- und Komponentenhersteller über die Suchmaschinen Google, Google Scholar und der Bibliothek der TU Graz identifiziert. Verwendet wurden die in Tabelle 3 gelisteten englischen Suchbegriffe in Verbindung mit „electric car“ und „BEV“ sowie die deutschen Übersetzungen davon.

Tabelle 3: Bei der Literaturrecherche verwendete Suchbegriffe (+ "electric car/BEV")

Verwendete Suchbegriffe	
consumption components	heater/heating efficiency
consumption dataset	PTC consumption
auxiliary consumption	thermal system consumption
air conditioning / A/C consumption	charging losses
cooling consumption	charging efficiency
cooling efficiency	battery heating PCM
heater consumption	A/C loops with active battery cooling and heat pump

Im Rahmen der Literaturrecherche haben wir insgesamt 72 Literaturquellen (Studien, Paper und Websites) identifiziert und gesichtet, von denen wir 41 Literaturquellen genauer analysiert haben. Davon wiederum befassen sich 18 Studien mit dem Gesamtverbrauch elektrischer PKW. Mehrheitlich (14 Studien) wird dieser Gesamtverbrauch in Abhängigkeit zur Außentemperatur betrachtet. Das System zur Innenraumklimatisierung (HVAC - Heating, Ventilation and Air Conditioning (deutsch „Heizung, Lüftung, Klimatechnik - HLK“)) in Gesamtheit thematisieren 5 Studien, 4 weitere betrachten einzelne Komponenten des HVAC-Systems. Zwei Studien fokussieren auf das Thema Nicht-Antriebs-Verbraucher im Allgemeinen.

Zudem ist der Ladevorgang immer Bestandteil der Wirkungsgradkette beim Betrieb eines Elektrofahrzeugs. Deswegen haben wir auch gezielt nach Literatur zum Thema Ladeverluste gesucht. Hierzu haben wir insgesamt 8 Literaturquellen gefunden, die überwiegend den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Ladeleistung betrachten. Eine Studie analysiert auch die Verluste bei extremen Temperaturbedingungen.

Da moderne Elektrofahrzeuge auch eine aktive Batterie-Heizung und -kühlung haben können, haben wir zu diesem Thema eine Schlagwortrecherche durchgeführt, die 5 Literaturquellen zu dem Thema identifiziert hat. Auch hier spielt u.a. die Abhängigkeit von der Außentemperatur eine Rolle. Insgesamt beschäftigen sich damit zwei Drittel aller gefundenen Literaturquellen mit der Abhängigkeit von der Außentemperatur.

Für die Interpretation der gefundenen Werte sind auch die folgenden Methoden zur Datenerhebung zu berücksichtigen:

- ▶ 8 Studien basieren ausschließlich auf Messungen im Realbetrieb von BEV-PKW
- ▶ 6 Studien lassen teilweise Realwerte in ihre Ergebnisse einfließen
- ▶ 5 Studien reflektieren ausschließlich Laborversuche (Rollenprüfstand, Klimakammer) und 6 weitere Studien bedienen sich teilweise solcher Laborwerte.
- ▶ 18 Studien nutzen ausschließlich Rechenmodelle
- ▶ 4 Studien beziehen sich allein auf weitere Literaturquellen

Die Verfügbarkeit von Realdaten ist in der Literatur also eingeschränkt, wird aber durch die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Messungen der TU Graz ergänzt, die zusätzlich auch Simulationen (Gesamtverbrauch und Klimaanlagen) durchgeführt hat (siehe Kapitel 2.2).

Auch haben wir nur wenige Werte gefunden, die eine klare Vergleichbarkeit (gleiche Maßeinheiten, Berechnungs- und Messmethoden) aufweisen und für den vorliegenden Bericht verwendbar waren. Durch Umrechnung konnten wir die Werte zwar näherungsweise vergleichbar machen, die Randbedingungen der Daten unterscheiden sich aber dennoch.

Eine Einschränkung bei der Vergleichbarkeit der Studien stellt auch das Erscheinungsjahr dar. Es wurden mit einer Ausnahme (2014) nur Studien von 2015 und jünger betrachtet. Mehrheitlich (31 von 41) sind die Studien von 2018 und jünger. Die Entwicklung im Bereich batterieelektrischer Fahrzeuge und insbesondere der Klimakomponenten ist jedoch so dynamisch, dass ein erheblicher Unterschied in den Werten und Aussagen bestehen kann, abhängig von der Fahrzeuggeneration, mit denen die Tests durchgeführt wurden bzw. dem Wissensstand bei der Modellierung.

3.2 Anteil der NAE-Verbraucher am Gesamtenergieverbrauch

Während verschiedene Quellen ein gutes Bild des realen Gesamtenergieverbrauchs von Elektroautos liefern (siehe Kapitel 2.2), gibt es nur wenige Daten zum Energieverbrauch der einzelnen NAE-Verbraucher oder ihrem Anteil am Gesamtverbrauch. Die verfügbaren Daten beziehen sich dabei auch vor allem auf Verbrennerfahrzeuge, während bei Elektroautos ggf. andere Nutzungsmuster sowie weitere Verbraucher (z.B. Heizung, Batterietemperierung, Ladeverluste) hinzukommen.

Eine differenzierte Zusammenstellung des mittleren Leistungsbedarfs verschiedener NAE-Verbraucher wurde für die Simulationen im Rahmen des HBEFA verwendet (siehe Tabelle 4). Diese basiert auf Literaturangaben, Auswertung eigener Prüfstandmessungen und teilweise auch Schätzungen, da nicht für alle NAE-Verbraucher plausible Daten gefunden wurden. Die Zusammenstellung fokussiert jedoch auf Verbrennerfahrzeuge und einige Komponenten sind auch nur temporär in Betrieb. Um den tatsächlichen mittleren Leistungsbedarf und Energieverbrauch bei Elektroautos zu plausibilisieren, wurden daher Jahresanteile für den Einsatz auf Basis der bisher für Verbrenner verwendeten Daten abgeschätzt.

Auch wenn die Jahresanteile mangels empirischer Daten nur grob geschätzt werden konnten, zeigt sich ein eindeutiges Bild: Die Klimaanlage dominiert den mittleren Leistungsbedarf und damit auch NAE-Verbrauch. Auch die Steuergeräte haben einen relevanten Anteil. Diese werden auf Englisch als ECU (Electronic Control Unit) bezeichnet und berechnen alle im Fahrzeug erforderlichen regel- und Steuervorgänge. Dafür empfangen sie die Signale aller Sensoren und senden Befehle an die Aktuatoren. Eine Basisfunktion ist z.B. die Bremskraft, die je nach Situation auf elektrische und mechanische Leistung aufgeteilt werden muss. Die entsprechenden Vorgaben müssen an Spannungs- und Frequenzumrichter sowie an Bremskraftverstärker gesendet und in einem Regelkreis angepasst werden. Zunehmende Umfänge an Fahrerassistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen mit zugehörigen Sensoren und komplexen Rechenalgorithmen lassen erwarten, dass der Leistungsbedarf der ECUs in Zukunft steigt. Daten zum mittleren, realen Leistungsbedarf der ECUs waren bisher nicht zu finden. Für das HBEFA wurden die ECU-Leistungen anhand von typischen PC Leistungsdaten abgeschätzt.

Die weiteren Komponenten haben dagegen einen deutlich niedrigeren mittleren Leistungsbedarf im niedrigen zweistelligen Wattbereich. Dabei spielen vor allem Sensoren sowie die Lenkhilfepumpe und Scheinwerfer noch eine relevante Rolle mit einem mittleren Leistungsbedarf im Bereich von 40 Watt.

Insgesamt ergibt sich aus der Aufstellung in Tabelle 4 ein mittlerer Leistungsbedarf der NAE-Verbraucher von Elektroautos von ca. 540 Watt, der jedoch die bei einigen Elektroautos zusätzliche Batterietemperierung sowie die Ladeverluste noch nicht berücksichtigt. Dies entspricht bezogen auf die Durchschnittsgeschwindigkeit der nach TREMOD gewichteten Verkehrssituationen des HBEFA von 63 km/h einem mittleren Verbrauch von knapp 0,85 kWh pro 100 km.

Berücksichtigt man zusätzlich Ladeverluste in Höhe von durchschnittlich 17,5 % (siehe Kapitel 3.3.3) liegt der Verbrauch sogar bei 1 kWh pro 100 km. Dabei ist davon auszugehen, dass Elektroautos häufiger im Innenstadtbereich und damit bei niedrigeren Durchschnittsgeschwindigkeiten genutzt werden. Geht man z.B. aufgrund des höheren Innerortsanteils von einer Durchschnittsgeschwindigkeit von nur 40 km/h aus (gegenüber 63 km/h für Verbrenner), steigt dieser Verbrauch auf fast 1,6 kWh pro 100 km an. Eine Batterietemperierung ist dabei noch nicht eingeschlossen.

Bezogen auf den mittleren realen Energieverbrauch im Bereich von grob 18 kWh pro 100 km (siehe Kapitel 2.2) tragen die NAE-Verbraucher daher bereits ohne die Batterietemperierung je nach Durchschnittsgeschwindigkeit wahrscheinlich zwischen 6 % (bei 63 km/h) und 9 % (bei 40 km/h) zum Gesamtenergieverbrauch bei. Dies liegt auch in der Bandbreite des den in Kapitel 2.2 zwischen 3 % (Autobahn) und 15 % (bei 0 Grad vorkonditioniert) simulierten NAE-Verbrauchs. Der Anteil der NAE-Verbraucher im WLTP wurde in Kapitel 2.2.3.3 mit gut 3 % berechnet und kann auch gut über die dabei eingeschalteten Verbraucher plausibilisiert werden. Damit wird jedoch etwa 40 % des NAE-Verbrauchs im WLTP nicht berücksichtigt.

Da bei konventionellen PKW alle elektrischen Verbraucher mit dem Wirkungsgrad der Lichtmaschine (ca. 60 % in HBEFA angenommen) in mechanische Leistung für den Verbrennungsmotor umgerechnet sind, bei Elektro-PKW dagegen mechanische Verbraucher elektrisch angetrieben werden müssen, sind bei BEV teilweise auch etwas andere Leistungsbedarfe zu erwarten, als in Tabelle 4 auf Basis konventioneller PKW angenommen. Elektrische Zusatzheizungen werden bei BEV sogar komplett entfallen, sofern diese im Verbrauch für die Klimaanlage berücksichtigt sind.

Tabelle 4: Mittlerer Leistungsbedarf einzelner NAE-Komponenten nach HBEFA-Simulation für Verbrenner-PKW sowie geschätzte Jahresanteile für BEV

NAE-Verbraucher	Ø Leistung im Betrieb [W]	Jahresanteil BEV	Ø Leistung im Jahr für BEV [W]	Ø Verbrauch BEV [Wh/100km]*
Klimaanlage	195	100 %**	195	309
Antrieb-Steuergeräte el.	63	100 %	63	99
Sensoren	80	50 %	40	63
Lenkhilfpumpe mech.	38	100 %	38	60
Scheinwerfer	150	25 %	38	60
Radio	30	90 %	27	43
Scheibenwischer	150	15 %	23	36
Sonst. Steuergeräte el.	20	100 %	20	32
Bremskraftverstärker mech.	-	-	20	32
Tagfahrlicht el.	20	100 %	20	32
Steering	16	100 %	16	25
El. Fensterheber	300	3 %	9,0	14
Heckscheibenheizung	120	5 %	6,0	9,5
Kennzeichenleuchten	20	25 %	5,0	7,9
Navigationssystem	15	30 %	4,5	7,1
Heckscheibenwischer	70	5 %	3,5	5,6
Frontscheibenheizung	500	1 %	2,5	4,0
Nebelscheinwerfer	100	2 %	2,0	3,2
Sitzheizung	400	1 %	2,0	3,2
Hupe	120	1 %	1,2	1,9
Innenleuchten	20	5 %	1,0	1,6
Beheizte Scheibenwaschanl.	80	1 %	0,4	0,63
El. Lenkradheizung	50	1 %	0,3	0,40
El. Schiebedach	200	0 %	0,2	0,32
El. Sitzverstellung	150	0 %	0,08	0,12
El. Spiegelverstellung	20	0 %	0,02	0,03
Summe			536	851

* bezogen auf die mittlere Geschwindigkeit des HBEFA-Zyklus von 63 km/h

** hier ist jahresdurchschnittlicher Verbrauch angegeben, der auch Fahrten ohne MAC beinhaltet

Quelle: Unveröffentlichte Parameterdaten der TU Graz und eigene Schätzungen

Tabelle 5 zeigt die Angaben zum Leistungsbedarf einzelner NAE-Verbraucher aus weiteren Literaturquellen und stellt sie den Annahmen aus dem HBEFA gegenüber. Verglichen werden nur Komponenten, zu denen aus mindestens zwei weiteren Quellen (zusätzlich zu HBEFA) Werte vorlagen. Die HBEFA-Werte liegen dabei größtenteils im Spektrum der anderen Literaturwerte:

- ▶ Die Innenraumheizung weist mit Werten zwischen 1.000 und maximal 4.000 Watt eine sehr hohe Bandbreite auf. Tatsächlich können Heizelemente mit sehr hohen Maximalleistungen eingesetzt werden, was einen Vorteil in der Geschwindigkeit des initialen Aufheizens bietet, jedoch für den Dauerbetrieb nicht erforderlich ist. Der im HBEFA verwendete Wert am unteren Rand der Literaturangaben ist daher für den Jahresmittelwert durchaus plausibel, da nur unter etwa 18°C Energie aus der Batterie für Heizmaßnahmen erforderlich ist.
- ▶ Literaturangaben zu Klimakompressor, Kühlmittelpumpe und Innenraumlüftung sind kaum trennscharf und werden im HBEFA auch nicht separat geführt, da alle HVAC-Komponenten als Gesamtsystem mit Hilfe AuSim situationsabhängig berechnet wurden. Hohe Werte finden sich für den Klimakompressor (bis 6.000 Watt), jedoch wie bei der Innenraumheizung voraussichtlich für extrem schnelles initiales Abkühlen. Andere Literaturquellen zeigen hier einen maximalen Leistungsbedarf zwischen 500 und 2.500 Watt.
- ▶ Bei der Lenkung gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Literaturangaben eines mittleren Leistungsbedarfs im Bereich von 400 bis 800 Watt und der HBEFA-Annahmen von 38 Watt. Möglicherweise handelt es sich bei den Literaturangaben jedoch um Spitzenwerte bei Lenkmanövern, die in der Praxis nur kurzfristig auftreten, während im HBEFA bereits ein Gesamtdurchschnitt berücksichtigt wurde.
- ▶ Literaturangaben zu Scheinwerfern zeigen eine Leistungsaufnahme im Bereich 100-150 Watt und bestätigen so die Annahmen im HBEFA. Hier wurden nur die Werte für ein konventionelles Beleuchtungssystem (kein LED) aufgeführt.
- ▶ Audiosystem bzw. Radio werden von allen Literaturquellen mit einem niedrigen Wert von 15-35 Watt beziffert, der sicherlich von der genauen Ausstattung und dem genauen Nutzungsverhalten abhängt.
- ▶ Scheibenwischer liegen mit Werten zwischen 30 und 150 Watt ebenfalls in einem niedrigeren Bereich. Die Bandbreite kann sich durch die Anzahl der verbauten Scheibenwischermotoren erklären.
- ▶ Fahrlicht LED bzw. Tagfahrlicht zeigen extrem niedrige Werte von nur 2 Watt. Die höheren Werte bis 50 Watt stellen Werte für ein LED-Abblendlicht dar.
- ▶ Elektrische Fensterheber können laut der Literaturquellen 80-150 Watt Leistungsbedarf haben, im HBEFA werden sogar 300 Watt angenommen. Die Einsatzzeiten können jedoch sehr gering vermutet werden (in HBEFA 3 %).
- ▶ Bei der Frontscheibenheizung variieren die Literaturwerte erheblich und reichen von 120 Watt (also identisch Heckscheibenheizung) bis 2.000 Watt. Der hohe Wert ist in der Quelle jedoch nicht näher dokumentiert und stellt wahrscheinlich einen Extremfall dar. Die übrigen Werte liegen im Bereich bis maximal 500 Watt und werden als plausibler angesehen.
- ▶ Der Leistungsbedarf der Sitzheizung wird in der Literatur tendenziell mit 100 bis 200 Watt etwas niedriger angegeben als im HBEFA angenommen (400 Watt).

Der Leistungsbedarf ist nach den Literaturangaben für die Klimatisierung (Innenraumheizung und Klimakompressor) damit mit Abstand am Größten. Bei den übrigen Komponenten werden deutlich geringere Leistungsbedarfe angegeben und es können z.T. auch sehr geringe Einsatzzeiten vermutet werden.

Tabelle 5: Energieverbrauch einzelner NAE-Komponenten laut verschiedener Literaturquellen

	(Kruppok et al. 2016)	(VARTA 2019)	(Busl 2011)	(Evtimov et al. 2017)	(Miri et al. 2021)	(Suchanek 2018)	(ADAC 2021)	HBEFA
NAE-Verbraucher	Max. Leistung im Betrieb [W]			Ø Leistung im Betrieb [W]				
Innenraumheizung	1.500		4000			3.000	bis zu 2000	1000
Klimakompressor	1.500		2500	500		0-6.000		-
Kühlmittelpumpe	500					0-100		-
Innenraumlüftung	400	170	250			100-400	170	-
Lenkung	1500				400	800		38
Scheinwerfer		100		150	120		125	150
Audiosystem / Radio				20	35	15-30	20	30
Scheibenwischer		80-150		30-50	40	30-150		150
Fahrlicht LED / Tagfahrlicht		50		50		2-60	8	20
El. Fensterheber	150	150			80	150		300
Heckscheibenheizung	200	120			250	120-200	800	120
Frontscheibenheizung	2000	120				250		500
Sitzheizung (pro Sitz)	150	100-200		30		100-200	100	400
El. Schiebedach		200				150-200		200

3.3 Abhängigkeit einzelner NAE-Verbraucher von den Umgebungsbedingungen

Wie die Messdaten der realen Verbrauchsmessungen der TU-Graz in Kapitel 2.2 zeigen, können die Energieverbräuche je nach Einsatzbedingungen variieren. Neben dem Fahrprofil kann auch die Umgebungstemperatur einen großen Einfluss auf den Verbrauch haben. Die damit verbundenen starken jahreszeitlichen Schwankungen haben somit auch starken Einfluss auf die Reichweiten der Fahrzeuge.

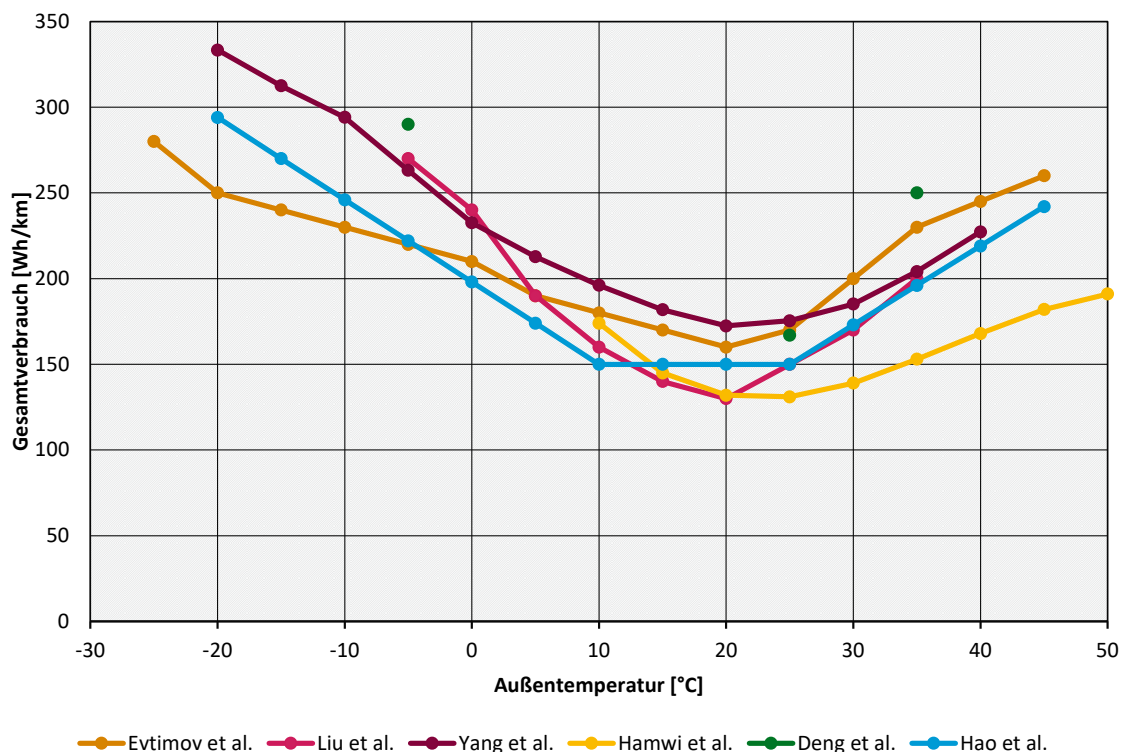
Eine umfangreiche Auswertung von Verbrauchsdaten von Elektrofahrzeugen aus mehreren Quellen zeigt die Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Umgebungstemperatur sehr deutlich (siehe Abbildung 11). Eine Vergleichbarkeit der in den Studien ermittelten Werte wurde durch die verschiedenen Einheiten erschwert. In etwa gleichen Anteilen lagen relative Anteile am Gesamtverbrauch und absolute Verbrauchsdaten in Wh/km vor, zum Teil jedoch

auch reine Leistungsangaben in Watt sowie zeitbasierte Angaben in Wh/min. Die Werte der Studien wurden zudem in unterschiedlichen Testzyklen real ermittelt bzw. simuliert. Für die vergleichende Darstellung wurden, sofern in der Literatur noch nicht angegeben, die Durchschnittsgeschwindigkeiten der jeweiligen Testzyklen recherchiert, worüber alle Werte auf Wh/km umgerechnet werden konnten.

Bei 20 Grad Umgebungstemperatur liegen die Gesamtverbrauchswerte nach den derart umgerechneten Literaturangaben im Bereich von 15 kWh/100 km, können jedoch insbesondere bei sehr kalten Temperaturen (- 20 Grad) auf bis das Doppelte ansteigen. Bereits bei 0 Grad zeigt sich aber auch schon ein deutlich erhöhter Verbrauch im Bereich von 20 bis 25 kWh pro 100 km. Auch bei hohen Temperaturen steigt der Verbrauch deutlich an und beträgt bei 30 Grad bis zu 20 kWh/100 km, bei 40 Grad sogar bis zu 25 kWh/ 100 km. Insgesamt führen kalte Außentemperaturen jedoch zu einer noch deutlicheren Erhöhung des Verbrauchs als warme Umgebungsbedingungen.

Aufgrund dieser starken Abhängigkeit wird für die größten NAE-Verbraucher die jeweils mögliche Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur näher untersucht. Hier steht insbesondere die Klimatisierung des Fahrgastraums im Mittelpunkt. Des Weiteren betrachten wir die Batterietemperierung (aktive Heizung und Kühlung der Batterie) von Elektrofahrzeugen, zu deren Beitrag zum Gesamtenergieverbrauch bisher nur wenig öffentlich verfügbare Literatur zu finden ist. Bei Elektrofahrzeugen sind darüber hinaus auch die Ladeverluste für den Gesamtverbrauch relevant. Daher werden diese beiden Aspekte ebenfalls detaillierter beleuchtet. Auch hier spielen die Umgebungsbedingungen eine besondere Rolle.

Abbildung 11: Gesamtverbrauch in Abhängigkeit der Außentemperatur



3.3.1 Klimatisierung Fahrgastraum

Das Heizsystem batterieelektrischer Fahrzeuge in der Basisausstattung unterscheidet sich von dem von Verbrenner-Fahrzeugen vor allem darin, dass der Wärmetauscher, der die Abwärme des Motors für den Fahrzeuginnenraum zur Verfügung stellt, durch einen elektrischen Widerstandsheizkörper (PTC – Positive Temperature Coefficient) ersetzt wird.

Die analysierten Literaturwerte für HVAC-Systeme zeigen naturgemäß eine deutliche Abhängigkeit des Leistungsbedarfs von der Umgebungstemperatur (siehe auch Kapitel 2.2.3). Dabei ist der Energiebedarf im Winter (Heizung und zum Teil Klimaanlage zur Luftentfeuchtung) tendenziell höher als im Sommer (nur Kühlung aktiv). Einen entscheidenden Einfluss auf den realen Verbrauch haben dabei auch die nutzerspezifischen Einstellungen. Die betrachteten Studien weisen auf diesen Umstand hin, quantifizieren den möglichen Effekt dieser Einstellungen jedoch nicht.

Da der Kalt- und Heißstart-Verbrauch in den ersten Minuten einer Fahrt (Instationärphase) deutlich höher ausfällt als im weiteren Verlauf, ist die Fahrtstrecke ein wichtiger Einflussfaktor. Der Realverbrauch des HVAC-Systems wird zusätzlich stark von Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Austrittsmassenstrom und der Anzahl der Passagiere und damit der abgestrahlten Wärme beeinflusst. Die genannten Parameter wurden bei der Ermittlung der in Abbildung 11 (Gesamtverbräuche) dargestellten Werte nur teilweise berücksichtigt: Nur in (Yang et al. 2021) wurde auch ein Rechenmodell verwendet, das die Fahrgastraumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Konzentration, durch die Passagiere erzeugte Körperwärme berücksichtigt. Über ein Wettermodell wird auch die Sonneneinstrahlung eingerechnet, Wärmeverluste durch die Karosserie fließen über ein Submodell in die Berechnung mit ein.

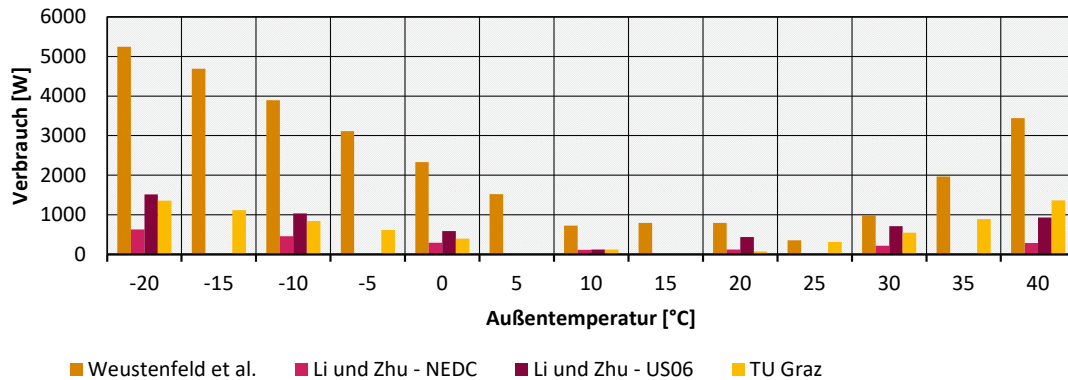
Die genauen Werte in der Literatur differieren jedoch erheblich. Mehrere Literaturquellen befassen sich speziell mit Heiz- und Kühlkonzepten für batterieelektrische Fahrzeuge. In Abbildung 12 wurden die Werte aus zwei dieser Quellen den durch TU Graz mit AuSim (siehe Kapitel 2.1.5.2) ermittelten Werten gegenübergestellt. Einen besonders hohen Leistungsbedarf hat (Weustenfeld et al. 2017) ermittelt, der bei -10°C fast 4.000 Watt und bei 30°C etwa 1.000 W beträgt. In dieser Studie wurde die Energieaufnahme des Heiz- und Kühlsystems nach 45 und 19 Minuten berechnet. Zu Grunde liegend sind dabei 78 in einem Modell simulierte Fahrten mit verschiedenen Wetterbedingungen (Luftfeuchte und Solarstrahlung), die ein durchschnittliches Nutzungsverhalten abbilden sollen. Für die Darstellung in Abbildung 12 haben wir einen Mittelwert aus den Werten für 19 und 45 Minuten gebildet.

(Li und Zhu 2014) haben dagegen deutlich niedrigere Werte ermittelt, die in einem 78 minütigen, auf dem US06 basierenden Testzyklus gut zu den von der TU Graz mit AuSim für Mischluftbetrieb der Klimaanlage berechneten Werten passen. Bei -10°C liegt der Leistungsbedarf bei etwa 850 Watt (TU Graz) bzw. 1.000 Watt (Li und Zhu 2014) und bei 30°C zwischen 550 Watt (TU Graz) und 700 Watt (Li und Zhu 2014). Für eine 270 minütigen, auf dem NEDC basierenden Testzyklus, ermitteln (Li und Zhu 2014) mit 464 Watt bei -10°C 464 und 222 Watt bei 30°C deutlich niedrigere Werte. Es kann vermutet werden, dass hier der Instationärverbrauch aufgrund der längeren Dauer eine geringere Rolle gespielt hat. Zusätzlich bedeutet die hohe mittlere Motorleistung bei einer auch höheren Durchschnittsgeschwindigkeit im US06 von 78 km/h wahrscheinlich einen höheren Kühlbedarf im Antriebsstrang.

Alle gezeigten Werte der Studien enthalten keine Vorkonditionierung der Fahrzeuge. Im Modell AuSim der TU Graz wurde auch der Leistungsbedarf für Frischluftbetrieb berechnet (siehe Kapitel 2.2.3.2). Dabei ergeben sich bei -10°C etwa 1.650 W, bei 30°C ca. 850 W. Die gewählte Einstellung der Klimaanlage hat also einen erheblichen Einfluss. Umluftbetrieb führt in den meisten Situationen zu dem geringsten Energieverbrauch. Nur bei gemäßigten

Außentemperaturen im Bereich von 20°C kann die rückgeführte Luft wegen der Abwärme der Passagiere und der Sonneneinstrahlung durch die Scheiben höhere Kühlleistung erfordern als die angesaugte Frischluft.

Abbildung 12: Verbrauch der HVAC-Komponenten in Abhängigkeit der Außentemperatur



Die Bandbreite der ermittelten Daten zeigt nicht nur Unsicherheiten auf, sondern bildet wahrscheinlich auch die aktuellen Unterschiede im HVAC-Verbrauch zwischen verschiedenen Herstellern und Modellen ab. So zeigen aktuelle Wintertests z.B. sehr unterschiedliche Mehrverbräuche bzw. Reichweiteneinbußen zwischen 10 % und 30 %, im Extremfall sogar bis zu 50 %⁵.

Die Relevanz des Verbrauchs der HVAC-Komponenten kann dabei für die verschiedenen Fahrzeugsegmente unterschiedlich sein. Dies zeigt z.B. das QUIET-Projekt (Qualifying and Implementing a user-centric designed and Efficient electric vehicle), in dem ein energie-optimierter BEV-Kleinwagen entwickelt wurde (siehe (Patrone et al. 2022)). Untersuchungen zur möglichen Wirkung der QUIET-Ansätze in verschiedenen Fahrzeugsegmenten (von Kompaktklasse über SUV bis zu Oberklasse) deuten darauf hin, dass die Energieeffizienz des HVAC-Systems relevanter für kleinere Fahrzeuge mit einem relativ geringen Fahrwiderstand ist. Der Verbrauch an Antriebsenergie liegt hier niedriger, so dass die Klimatisierung relativ an Bedeutung zunimmt. Für größere Fahrzeuge, insbesondere SUVs, ist es umgekehrt: Wegen des höheren Bedarfs an Antriebsenergie kommt dem HVAC-Energiebedarf eine niedrigere Bedeutung zu.

3.3.2 Batterietemperaturierung

Die Antriebsbatterie ist das zentrale Bauteil eines elektrischen Fahrzeuges. Chemisch bedingt hat die Batterie eine ideale Betriebstemperatur. Außerhalb dieses Bereiches kann sie weniger Leistung zur Verfügung stellen und es treten thermische Verluste auf. Ein Betrieb außerhalb des idealen Temperaturbereiches hat außerdem negativen Einfluss auf die Lebensdauer der Batterie.

Ein batterieelektrischer PKW muss nicht zwingend mit einer aktiven Batteriekühlung oder -heizung ausgestattet sein. Die ersten Volumen-Modelle (Nissan Leaf, VW eGolf) waren nur mit einer passiven Kühlung ausgestattet (Rathberger 2021). Bei Performance-Modellen ist eine Kühlung jedoch notwendig und wird mit der Entwicklung hin zu höheren Ladeleistungen auch bei günstigeren Fahrzeugen immer mehr zum Standard. Dabei kommt ein Kältemittel zum

⁵ <https://www.wiwo.de/unternehmen/auto/grosser-wintertest-manche-e-autos-ertragen-die-kaelte-besser-als-andere/28049626.html> (Zugriff am 09.11.2022)
<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-reichweite-winter/> (Zugriff am 23.11.2022)

Einsatz, dass die Batteriezellen umfließt und durch den Klimakompressor gekühlt bzw. ein PTC-Element erhitzt wird.

Eine Erwärmung der Batterie findet durch ihren Innenwiderstand auch beim Laden, insbesondere Schnellladen, oder im Fahrbetrieb statt. Für den Nutzungskomfort und die Verbesserung der Lebensdauer der Batteriezellen kann es jedoch sinnvoll sein, die Batterie aktiv zu heizen. Damit verbessert sich die Schnellladefähigkeit, so dass, falls notwendig, bereits kurz nach dem Start mit hoher Leistung geladen werden und volle Leistung für den Antrieb abgerufen werden kann. (Deng et al. 2021) konnten bei einem Testfahrzeug bei einer Umgebungstemperatur von -7°C im ersten Fahrzyklus (30 Minuten) einen Mehrverbrauch von 0,5 kWh für das PTC-Element der Batterieheizung messen, der bei den weiteren Fahrzyklen nicht mehr auftrat. Dies entspricht einem Leistungsbedarf von 1.000 W, der im Jahresgang jedoch nur sehr kurzzeitig auftreten dürfte. Durch die TU Graz wurden zusätzlich Daten eines ID.3 gemessen (siehe Kapitel 2.2.3.1). Hier lag der Wert bei Start in einer Umgebungstemperatur von $4,5^{\circ}\text{C}$ mit 730 Wh und einer Heizdauer von 900 Sekunden deutlich höher. Für die Simulation der NAE-Verbräuche in Kapitel 4 wird der Wert über die spezifische Wärmekapazität einer Hochvoltbatterie näherungsweise berechnet. Dabei ergibt sich ein Wert, der zwischen den beiden zuvor genannten liegt.

Der Bedarf an Batterietemperierung kann dabei möglicherweise für verschiedene Zelltypen unterschiedlich sein. So wird der LFP-Zelle eine schlechte Winter-Tauglichkeit zugeschrieben, die sich in einer niedrigeren Ladeleistung bei kalten Temperaturen zeigen könnte.

Untersuchungen von (Łebkowski 2017) zum Innenwiderstand verschiedener Zelltypen bei unterschiedlichen Temperaturen zeigen für die LFP-Zelle jedoch einen geringeren Wert über den gesamten Temperaturbereich. Dies lässt zumindest nicht darauf schließen, dass der Einsatz von LFP-Zellen in jedem Fall eine geringere Energieeffizienz des Batteriesystems bedeutet. Die analysierte Literatur erlaubt jedoch keine abschließende Schlussfolgerung dazu.

Die Batteriekühlung kommt bei sehr hohen Umgebungstemperaturen zum Einsatz. Auch bei (mehrfachem) Schnellladen kann die Batterie Temperaturen erreichen, die eine Kühlung notwendig machen, damit die Ladeleistung nicht gedrosselt werden muss.

3.3.3 Ladeverluste

Der Ladevorgang ist immer Bestandteil der Wirkungsgradkette für den Betrieb eines Elektrofahrzeugs, daher spielen Ladeverluste für den Gesamtenergieverbrauch eine wichtige Rolle. Die notwendige Umwandlung zwischen Wechsel- und Gleichstrom kann im Fahrzeug oder in der Ladesäule erfolgen. Gängige PKW-Modelle haben Gleichrichter bis 22 kW im Fahrzeug verbaut, einphasig kann damit bis 7,2 kW geladen werden. Ladeleistungen größer 22 kW werden in der Regel nicht im Fahrzeug gleichgerichtet, die Umrichtung findet dann in der Ladesäule statt, so dass die höheren Verluste dann an der Ladesäule anstatt im Fahrzeug entstehen.

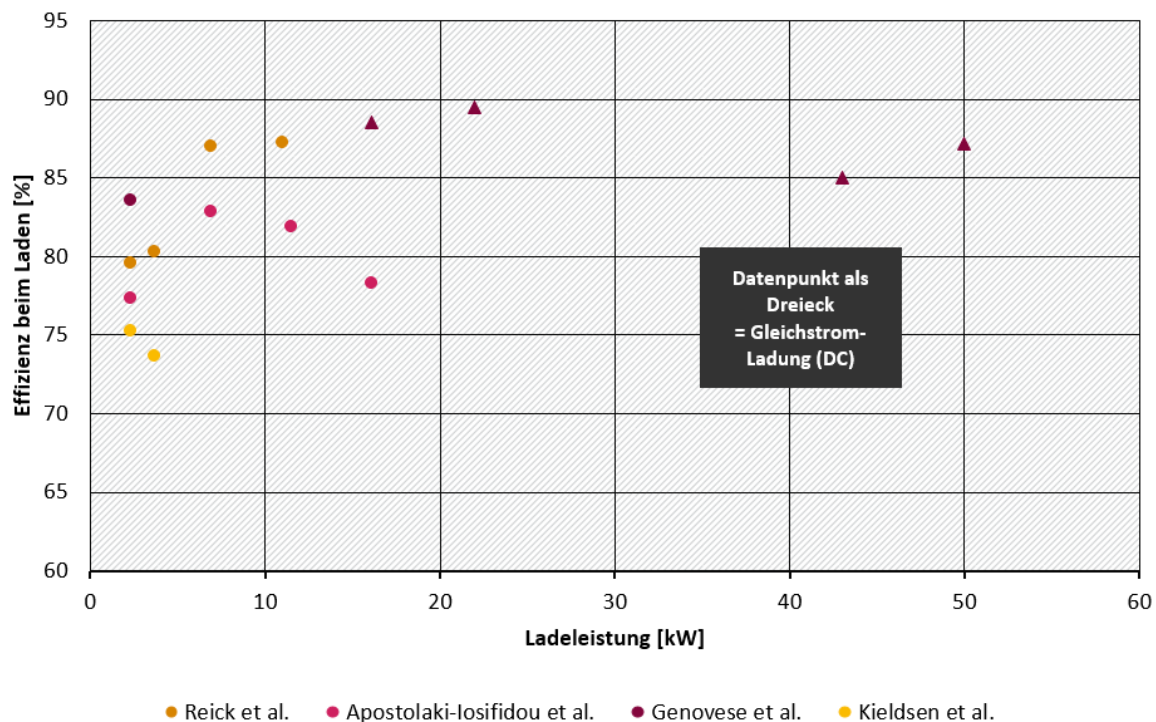
Untersucht wurden die Ladeverluste auf Basis von Literaturwerten sowie Messungen der TU Graz. Dabei wurde ein Fokus auf verschiedene Rahmenbedingungen gelegt. Dabei wird in nur einer Studie (Apostolaki-Iosifidou et al. 2017) die Abhängigkeit vom Ladestand (State-of-Charge – SOC) untersucht, die jedoch sehr klein ist. Dabei ist auch keine klare Abhängigkeit zwischen Ladestand und Wirkungsgrad ersichtlich, so dass der Ladestand mit den vorliegenden Studien nicht als wesentlicher Einflussfaktor identifiziert werden konnte. Für den weiteren Vergleich mit den Werten anderer Studien wurde hier ein Mittelwert über die Werte bei verschiedenen Ladeständen errechnet.

Vier Studien betrachten den Wirkungsgrad beim Laden in Abhängigkeit von der Ladegeschwindigkeit (Reick et al. 2021), (Apostolaki-Iosifidou et al. 2017), (Kiildsen et al. 2016), (Genovese et al. 2015). Für die Ermittlung der Werte wurden verschiedene Fahrzeuge verwendet. Übereinstimmend zeigen die Studien einen schlechteren Wirkungsgrad im Bereich niedriger Ladeleistungen (kleiner 6 kW) (siehe Abbildung 13). Es wurden Wirkungsgrade bei Leistungen von 2,3 kW (230 V, 10 A) bis 50 kW (Gleichstromladung) ermittelt. Die Werte liegen in einer Bandbreite von 74-90 %. Der Mittelwert für den Ladewirkungsgrad über alle Werte liegt bei 82,5 %, die Ladeverluste betragen also durchschnittlich 17,5 %. In den Studien sind Schnellladungen mit Ladeleistungen größer 50 kW noch nicht berücksichtigt. Physikalisch ist hier tendenziell von einem etwas schlechteren Wirkungsgrad auszugehen, da die hohen Ströme größere Wärmeverluste verursachen.

Neben den wissenschaftlichen Studien gibt es Datenquellen (Websites), die die Verbräuche laut Bordcomputer der PKW zu den vom Ladepunkt aufgenommenen Energiemengen ins Verhältnis setzen und darüber die Ladeverluste unterschiedlicher Modelle berechnen (siehe (Erbe 2020), (Otto 2021)). Der ADAC hat dabei einheitliche Fahrprofile (ADAC Ecotest) bei gleichen Umweltbedingungen zu Grunde gelegt. Geladen wurde mit der gleichen Wallbox (22 kW) mit der jeweils vom Bordladegerät des Fahrzeugs unterstützten maximalen Leistung. Die Werte differieren deutlich über die untersuchten Modelle und haben eine Bandbreite zwischen ca. 10 und 25 %. Die Mittelwerte liegen jedoch bei 17,5 % und stützen somit genau den Wert aus den 4 zuvor genannten Studien.

In (Trentadue et al. 2018) wird darüber hinaus auch der Wirkungsgrad beim Laden unter extremen Temperaturbedingungen untersucht. Dazu wurde ein PKW (Nissan Leaf) mit Schnellladesäulen verschiedener Hersteller in einer Klimakammer geladen. Unter Idealbedingungen (25°C) betrug die Nenn-Ladeleistung 50 kW und es wurden Wirkungsgrade über 90 % gemessen. Bei niedrigen und sehr hohen Temperatur wurden die Ladeleistungen dagegen durch das Batterie-Management-System (BMS) des Fahrzeugs reduziert, so dass die Ladesäulen dieser reduzierten Leistung folgen müssen. Der Einfluss der Leistungsreduzierung auf den Wirkungsgrad fällt für die verschiedenen Säulenhersteller jedoch sehr unterschiedlich aus: Bei -15°C zeigt der Wirkungsgrad eine Spannbreite zwischen 62 % und 89 % und bei +40°C zwischen 77 und 90 %. Damit zeigt sich tendenziell zwar eine mögliche Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, die aber nicht systematisch über alle Hersteller auftritt.

Abbildung 13: Effizienz beim Laden in Abhängigkeit der Ladeleistung



3.4 Entwicklungspotenzial wichtiger NAE-Verbraucher

Neben Einzelpotenzialen auf Komponentenebene wird in Zukunft der Vernetzung der Komponenten sowie den entsprechenden Regelungsstrategien zur Heizung und Kühlung des Innenraums, auch im Zusammenspiel mit dem Thermomanagement der Batterien, eine größere Bedeutung zukommen und zu weiteren Einsparungen führen. Aufgrund des hohen Leistungsbedarfs in bestimmten Temperaturbereichen werden aktuell auch verschiedene Strategien der Verbrauchsminderung betrieben.

Die Verwendung eines Widerstandsheizers (PTC) um den Fahrzeuginnenraum zu wärmen ist zwar eine funktionelle, jedoch wenig effiziente Lösung. Sie führt zu einem erheblichen Mehrverbrauch bei Einsatz der Heizung. Die meisten heutigen Modelle können optional mit einer Wärmepumpe bestellt werden, bei höheren Modellklasse gehört diese Technik bereits zur Serienausstattung. Ein PTC-Element bleibt dabei meist weiterhin im Fahrzeug verbaut, falls der Wärmebedarf höher ist, als durch die Wärmepumpe erzeugt werden kann (Instationärphase oder bei extrem kalten Temperaturen). Bei den meisten Einsatzbedingungen führt ein Klimasystem mit Wärmepumpe bereits zu einer deutlichen Energieeinsparung. Das bedeutet: Wenn diese Technologie zunehmend zum Standard und auch bei kleineren Fahrzeugklassen zur Serienausstattung wird, sind Energieeinsparungen im Gesamtbestand der BEV zu erwarten.

Um einen hohen Passagierkomfort bei möglichst geringen Einsatz der Luft-Heizung zu ermöglichen sind heutige Elektro-PKW zusätzlich mit Quellen körperlärer Wärme ausgestattet. Sitzheizung auf allen Plätzen gehört bei nahezu allen Fahrzeugen zur Serienausstattung, häufig auch in Verbindung mit einer Lenkradheizung. Viele Fahrzeuge bieten zudem einen „Driver-Only-Mode“, so dass der Luftstrom auf den Fahrer/die Fahrerin konzentriert werden kann, wenn sich keine weiteren Passagiere im Fahrzeug befinden. Die meisten Elektro-PKW bieten zudem die Möglichkeit einer Vorkonditionierung des Fahrzeugs per Zeitsteuerung oder App auf eine gewünschte Temperatur. Diese Möglichkeit steht teilweise jedoch nur zur Verfügung, wenn das Fahrzeug mit dem Stromnetz verbunden ist (allerdings führt die Vorkonditionierung zu

etwa dem selben Mehrverbrauch wie eine Konditionierung nach Start, nur nicht zulasten der Reichweite).

So erzeugt auch der Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen Abwärme, die allerdings geringer als bei Verbrenner-PKW ist. Dennoch ist es sinnvoll, den Wärme-Kälte-Kreislauf des Fahrgastraumes und der Antriebskomponenten (Batterie, Elektromotoren) zu vernetzen. So kann die Abwärme der Elektromotoren insbesondere bei hohem Leistungsabruf (Autobahnfahrt, Rekuperation) aber auch der Batterie (Schnellladung) zur Heizung des Innenraums genutzt und gleichzeitig der Kühlbedarf der Komponenten verringert werden. Mit zunehmender Entwicklungsreife der Elektro-PKW wird die Komplexität dieser Vernetzung höher. In optimierten Systemen können Ventile die Wärme- und Kälte-Flüsse zudem so steuern, dass der gewünschte Passagierkomfort erreicht wird und gleichzeitig die Antriebsbatterie im idealen Temperaturbereich arbeiten kann (siehe auch Kapitel 3.3.2). Der Optimierungsgrad wird hier nicht nur über die Wahl der entsprechenden Komponenten und die Tiefe der Vernetzung bestimmt, sondern kann auch ganz erheblich über die softwareseitige Abstimmung der Sensoren, Regelventile, Heizelemente und Pumpen bestimmt werden.

Neben der Vorkonditionierung des Fahrzeug-Innenraums zum geplanten Abfahrtszeitpunkt kann bei modernen Fahrzeugen auch die Batterie auf eine Temperatur gebracht werden, bei der sie einen geringeren Innenwiderstand aufweist und damit weniger Wärmeverluste erzeugt. Dies ermöglicht es, den Verbrauch während der Fahrt zu senken und somit die erzielbare Reichweite zu erhöhen. Ein Vorheizen der Batterie vor dem Ladevorgang bei niedrigen Temperaturen während der Fahrt erhöht nicht nur die Ladeleistung, sondern verringert auch die Ladeverluste. Allerdings muss diese Energie wiederum der Batterie entnommen werden.

Zwei der betrachteten Studien befassen sich mit dem Einsatz von thermischen Energiespeichern zur Ergänzung des Heiz- und Kühlsystems. Bei Wahl eines solchen Elements mit einem Gewicht von 10 kg konnte ein deutlich positiver Einfluss auf den Verbrauch der Fahrzeuge ermittelt werden (siehe (Weustenfeld et al. 2017) und (Li und Zhu 2014)). Allerdings ist eine entsprechende Vorkonditionierung des Systems erforderlich. Auch könnte ein thermischer Speicher die Verlustwärme aus dem Antriebsstrang aufnehmen und bei Bedarf wieder nutzbar machen, zum Heizen des Innenraums oder der Batterie.

Neben den möglichen Einsparungen durch die Vernetzung der einzelnen Komponenten, bieten auch die Komponenten selbst weitere Optimierungspotentiale. Durch einen verstärkten Einsatz von Wärmepumpen kann die Effizienz des HVAC-Systems erhöht werden. Aber auch die Weiterentwicklung der Wärmepumpensysteme selbst, haben die Einsatzmöglichkeiten in den letzten Jahren weiter erhöht. Insbesondere Effizienz, Platzbedarf, Gewicht und Einsatzmöglichkeit bei niedrigen Temperaturen sollen zudem weiter verbessert werden. Neben den Wärmepumpen werden parallel auch klassische Elektroheizungen, Lüfter und Pumpen weiterentwickelt, um die Effizienz der elektrischen Zusatzheizungen weiter zu steigern. In Verbindung mit der intelligenten Steuerung können die Bauteile zunehmend stufenlos geregelt werden, was zu weiteren Einsparungen führt (Peng und Du 2016).

4 Simulation des Einflusses von NAE-Verbrauchern auf den Gesamtenergieverbrauch von BEV

In diesem Kapitel wird ergänzend zu den Literaturwerten der zu erwartende Einfluss verschiedener NAE-Verbraucher auf den Energieverbrauch eines Elektro PKW der Kompaktklasse in verschiedenen Betriebszuständen mittels Simulation dargestellt. Dazu wurden die in den Kapiteln 2 und 3 gesammelten Informationen in den Eingabedaten der Simulationstools PHEM und AuSim abgebildet. Folgende Betriebszustände wurden berechnet:

- Kompakt-Elektro PKW mit durchschnittlicher Effizienz
- Kompakt-Elektro PKW mit optimaler Effizienz

Jeweils mit Beladung nach WLTP mit NAE-Energiebedarf für:

1. WLTP-Typprüfeinstellung
2. Realfahrt bei -10°C
3. Realfahrt bei 0°C
4. Realfahrt bei 10°C
5. Realfahrt bei 20°C
6. Realfahrt bei 30°C
7. Realfahrt Jahresmittel Klima Deutschland

Jeweils für folgende Zyklen:

- a) WLTC
- b) Realzyklus HBEFA Mix Deutschland Autobahn
- c) Realzyklus HBEFA Mix Deutschland Stadtfahrt
- d) Realzyklus HBEFA Mix Deutschland Außerortsfahrt
- e) Realzyklus RDE Mix Graz
- f) Realzyklus RDE Mix Graz Stadtfahrt
- g) RDE Test Ries Graz
- h) ADAC Ecotest Zyklus für BEV

Die Zyklen b) bis d) wurden aus den HBEFA-Zyklen mit hohen Fahrleistungsanteilen, jeweils mit ebener Fahrbahn zusammengestellt, so dass der gewichtete Verbrauch aller HBEFA-Verkehrssituationen getroffen wird (Politschnig, 2022). Der „Realzyklus RDE Mix Graz“ ist ein Auszug aus Ries-RDE Testfahrten der TU Graz, der aber nur 23 km Länge hat und zu je einem Drittel der Strecke Innerorts-, Außerorts- und Autobahnfahrt umfasst. Damit sollte er typische Fahranteile gut abbilden. Die Stadtfahrt (Zyklus f) ist der Innerortsteil davon. Der RDE Test Ries Graz ist ein mittlerer, mit dem Volkswagen ID.3 gemessener Ries-RDE Testzyklus. Die Zyklen e) bis g) beinhalten die auf diesen Testrunden gemessenen Fahrbahnsteigungen.

Tabelle 6: Übersicht zu den verwendeten Fahrzyklen

	Strecke	Mittlere Geschwindigkeit	Steigung
Zyklusname	[km]	[km/h]	[%]

	Strecke	Mittlere Geschwindigkeit	Steigung
WLTC	23,3	46,5	0 %
Autobahn Deutschland	260,1	118,9	0 %
Innerorts Deutschland	19,4	24,8	0 %
Überland Deutschland	94,0	68,4	0 %
RDE Mix Graz	23,0	47,4	real
RDE Mix Graz Stadtfahrt	6,6	22,3	ja
RDE Ries-Test	90,9	53,7	ja
ADAC Ecotestzyklus BEV	28,4	52,2	0 %

Als Variation zur WLTP-Beladung wurde auch die mittlere Beladung nach HBEFA 4.2 simuliert. Die Zyklen e) bis g) wurden insbesondere zum Vergleich mit den in Kapitel 2 gemessenen und gesammelten Verbrauchsdaten simuliert.

Durch die Simulation der NAE-Energieverbrauchswerte für die Umgebungsbedingungen 1) bis 7) sind diese konsistent für die unterschiedlichen Umweltbedingungen. In Kapitel 3 sind dazu bereits unterschiedliche Quellen analysiert worden, von denen keine Literaturstelle alle oben angegebenen Zustände abdeckt. Wir haben in der Simulation jeweils eher effiziente Einstellungen gewählt, da diese nach den Messdaten in Kapitel 2 am plausibelsten für BEV sind. Andere BEV-Typen oder auch Fahrer können durchaus bessere oder schlechtere NAE-Effizienz erreichen, wenn z.B. in der Fahrgastraumheizung hohe Frischluftanteile gewählt werden oder die Klimaanlage eine schlechtere Leistungszahl hat. Die gewählten Einstellungen und Ergebnisse sind hier dokumentiert.

4.1 Fahrzeugdaten

Die Fahrzeugdaten wurden aus einer Recherche zu typischen Daten von Kompakt BEV-PKW gewonnen und sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Für das „effiziente“ BEV wurde eine um 5 % geringere Fahrzeugmasse (ohne Batterie) als für das Durchschnitts-BEV angesetzt, um geringere Sonderausstattung und besseren Leichtbau abzubilden. Zusätzlich wurde eine Reichweite von 250 km statt der 375 km für den Durchschnitt angenommen und die dafür nötige Batteriemasse mit 7,5 kg/kWh Batterie korrigiert. Für das Durchschnitts-BEV wurden 8 kg/kWh Batteriekapazität angenommen. Die Netto-Kapazität wurde mit 90 % der Brutto-Kapazität angesetzt (nutzbarer SOC zwischen 5 % und 95 %).

Tabelle 7: Übersicht der Fahrzeugdaten für die Simulation des mittleren und des effizienten Kompakt-BEV-PKW

	Durchschnitt	Effizient
Leermasse [kg]	1.700	1.440
Nennleistung (30') [kW]	100	100
Batteriekapazität netto [kWh]	50	30

	Durchschnitt	Effizient
Rollwiderstandsbeiwert F_{r0} [N/N]	0,0058	0,00551
$C_w \times A$ [m ²]	0,6583	0,5902
NAE-Leistungen in:		
WLTC Typprüfung [W]	200	200
Real -10°C [W]	1382	1131
Real 0°C [W]	851	680
Real 10°C [W]	485	379
Real 20°C [W]	410	376
Real 30°C [W]	856	826
WLTP-Verbrauch ⁽¹⁾ [kWh/km]	0,157	0,141
Reichweite im WLTC [km]	375	250

(1) inkl. Ladeverluste von 17,5 %

In der Simulation wurde die unterschiedliche Luftdichte bei verschiedenen Temperaturen jeweils mit gleichem Druck (1,013 bar) über die ideale Gasgleichung berechnet. Der Luftwiderstand erhöht sich damit bei einer Abkühlung von 20°C auf -10°C um 11,4 %.

4.2 Energieverbrauch Nebenaggregate

Die mittlere Leistung des HVAC-Systems und der anderen Nebenverbraucher wurde mit dem AuSim Modell (siehe Kapitel 2.1.5.2) berechnet. Die Luftfeuchte und Sonneneinstrahlung für die Soll-Umgebungstemperaturen wurden aus Durchschnittswerten von Wetterdaten aus Athen, Frankfurt und Helsinki bestimmt, um die Bereiche von -10° bis 30°C ausreichend abzudecken.

Um den Mittelwert für Deutschland zu bestimmen wurden die stündlichen Wetterdaten von Frankfurt als Basis verwendet und geringfügig verschoben um die Durchschnittstemperatur Deutschlands zu treffen. Die stündlichen Wetterdaten wurden mit Tagesganglinien des Verkehrsaufkommens verschnitten um fahrleistungsabhängige Mittelwert zu generieren.

Tabelle 8: Klimadaten für die Berechnung der HVAC-Leistungsbedarfe und berechneter Wärmeaustausch zwischen Umgebung und Fahrgastraum

Kommentar	Temperatur	Luftfeuchtigkeit	Solarstrahlung	Wärmeeintrag Fahrgastraum
	[°C]	[%]	[W/m ²]	[W]
	-10	96	16	-604
	-5	92	20	-503

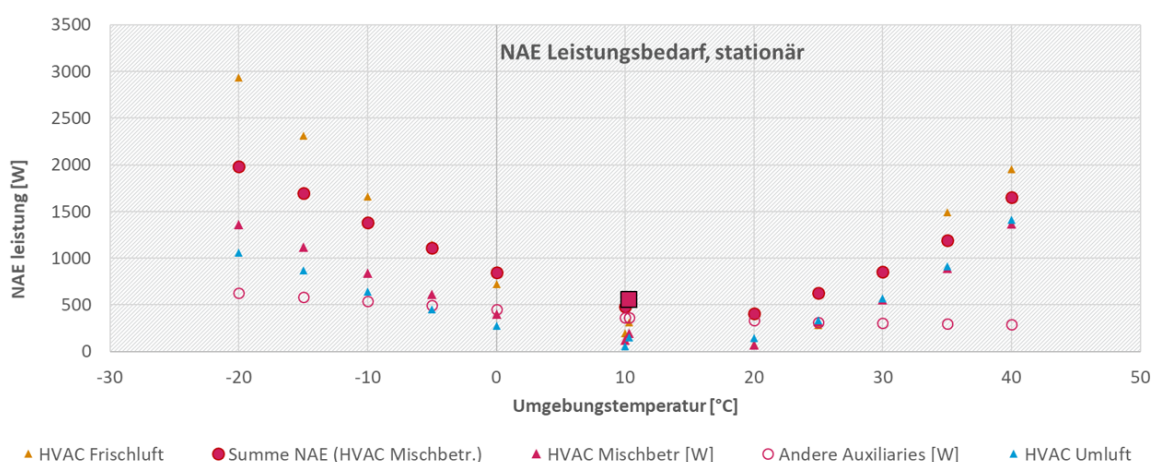
Kommentar	Temperatur	Luftfeuchtigkeit	Solarstrahlung	Wärmeeintrag Fahrgastraum
	0	88	161	-333
	10	78	302	-65
	20	64	442	203
	25	55	583	372
	30	43	681	520
Mittel Deutschland ⁽¹⁾	10.3	77	236	-92

(1) Mittelwerte für Deutschland aus stündlichen Wetterdaten, fahrleistungsgewichtet berechnet

Die stündlichen Klimadaten Deutschland wurden in eine Matrix zusammen gewichtet (12 Monate mit je 4 Zeitfenstern). Für diese 12x4 Klimawerte wurde der HVAC-Verbrauch zunächst einzeln berechnet und dann gewichtet, da sich mit dem Jahresmittelwert der Klimadaten ein zu geringer Verbrauch ergäbe, da der unter 10° und über 20°C jeweils deutlich ansteigende Leistungsbedarf dann unberücksichtigt bliebe. Neben dem Jahresmittelwert wurden auch für jede Temperaturstufe die NAE-Leistungen berechnet.

Im Mittel für die Klimamatrix Deutschland haben wir 195 W für HVAC im Mischbetrieb und in Summe für die NAE 556 W berechnet (siehe auch Tabelle 4). Das Ergebnis für konstante 10°C liegt zum Vergleich bei 485 W. Bei Frischluftbetrieb ergeben sich speziell bei niedrigen und hohen Umgebungstemperaturen deutlich höhere NAE-Verbrauchswerte (Abbildung 14). Die Werte in Abbildung 14 stellen jeweils den bezüglich Temperaturen stationären NAE-Betrieb dar. Zusätzlicher instationärer Energiebedarf wurde mit den Gleichungen aus Kapitel 2.2.3 berechnet und ist im nächsten Kapitel gezeigt.

Abbildung 14: Für den mittleren Kompakt-BEV berechnete Energieverbrauchswerte für HVAC und für die Summe der NAE-Verbraucher für verschiedene Umgebungszustände und HVAC-Einstellungen.



Ergebnisse Mittelwert Deutschland bei 10,3°C zu sehen (Magenta-Rechteck für Summe NAE), berechnet aus Klimamatrix über 12 Monate a 4 Tageszeiten

Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

Für das „effiziente Kompakt-BEV“ wurde eine intelligentere Klimaautomatik angenommen, die jeweils den niedrigsten Energieverbrauch aus Frischluft, Umluft und Mischbetrieb für den jeweiligen Umgebungszustand auswählt. Für die anderen NAE wurde in Summe ein um 10 % geringerer Leistungsbedarf angenommen. Die Differenz zwischen Durchschnitt und „effizient“ liegt jedenfalls im Bereich der in Kapitel 3.2 gefundenen Variabilität der Literaturdaten.

Um Mittelwert und Reduktionspotenziale verlässlich bestimmen zu können, müssten mehr BEV gemessen werden und dabei insbesondere auch der Energieverbrauch nach Antriebsenergie und NAE differenziert zu erfassen. Das erfordert einen hohen Aufwand im Messaufbau, da dafür der Messanschluss an mindestens zwei Stellen im Hochvoltnetz, z.B. bei Batterieausgang und Elektromotoreingang, hergestellt werden muss.

4.3 Ergebnisse für Beladung nach WLTP

Wir haben die Simulationen für 8 Zyklen für insgesamt 7 „NAE-Szenarien“ durchgeführt. Die Berechnung erfolgte einmal für das Durchschnitts-BEV und einmal für das effiziente BEV sowie jeweils mit WLTP Beladung (160 kg für das kompakt BEV) und mit der Beladung konventioneller PKW im HBEFA 4.2 (230 kg⁶). Mit zunehmendem Flottenanteil könnten sich die Beladungen von BEV in Richtung HBEFA entwickeln, da sie vermehrt als Erstautos im Haushalt genutzt würden. Derzeit erscheint die WLTP-Beladung aber noch repräsentativ zu sein. Abbildung 15 zeigt die Auswertung für das WLTP-beladene durchschnittliche Kompakt-BEV für die NAE-Szenarien für 4 verschiedene Zyklen.

- ▶ Bei allen Zyklen ergeben sich bei 20°C die geringsten Verbrauchswerte. Die höchsten Temperatureinflüsse sind beim Stadtzyklus zu sehen. Wegen der geringen Durchschnittsgeschwindigkeit von 22,3 km/h tragen die zeitlich konstanten NAE-Verbraucher zum Energieverbrauch je Kilometer hier in hohem Ausmaß bei.
- ▶ Bei 10°C Umgebungszustand ist der Anteil stationärer NAE etwa 15 % am Gesamtverbrauch ohne Ladeverluste. Die Konditionierung von Fahrgastraum und Batterie haben ca. 25 % Anteil. Ladeverluste wurden in der Grafik in allen Fällen mit 17.5 % aufgeschlagen (siehe Kapitel 3.3.3).
- ▶ Bei -10°C steigt die Antriebsarbeit des Motors je km geringfügig gegenüber höherer Umgebungstemperatur (zunehmende Luftdichte). Der Energieverbrauch für instationäres und stationäres Heizen steigt aber um mehr als den Faktor 4 an. Die Batteriekonditionierung ist allerdings nur bei der ersten Fahrt (Kaltstart) in diesem Umfang zu erwarten. Wegen der großen thermischen Masse und bei guter Isolierung wird das Auskühlen eher langsam erfolgen.
- ▶ Der geringste Einfluss der NAE ist beim Autobahnzyklus zu sehen, da stationäre NAE-Verbraucher wegen der hohen Geschwindigkeit einen geringeren Energieverbrauch je km haben. Infolge der langen Strecke (260 km) sind die Energieverbräuche je Gesamtstrecke für instationäre Aufwärm- bzw. Abkühlvorgänge niedrig. Die Ergebnisse der anderen Zyklen liegen bezüglich der NAE-Anteile erwartungsgemäß dazwischen.
- ▶ Die Realzyklen RDE-Mix, Deutschland HBEFA 1/3 Mix, ADAC Ecotest, ergeben mit realem NAE-Bedarf jeweils ähnliche Verbrauchswerte und liegen bei 10°C etwa 25 % höher als der

⁶ Aus dem Abgleich mit den Realverbrauchdaten ergaben sich 297 kg für Diesel und 183 kg für Otto-PKW, was auf die unterschiedliche Nutzung zurückzuführen sein dürfte, wobei Otto-PKW häufiger als (kleinere) Zweit- und Dritt-PKW im Haushalt genutzt werden dürften und so auch weniger für Urlaubsfahrten genutzt sind. Wir haben Diesel und Otto hier mit 40:60 gewichtet.

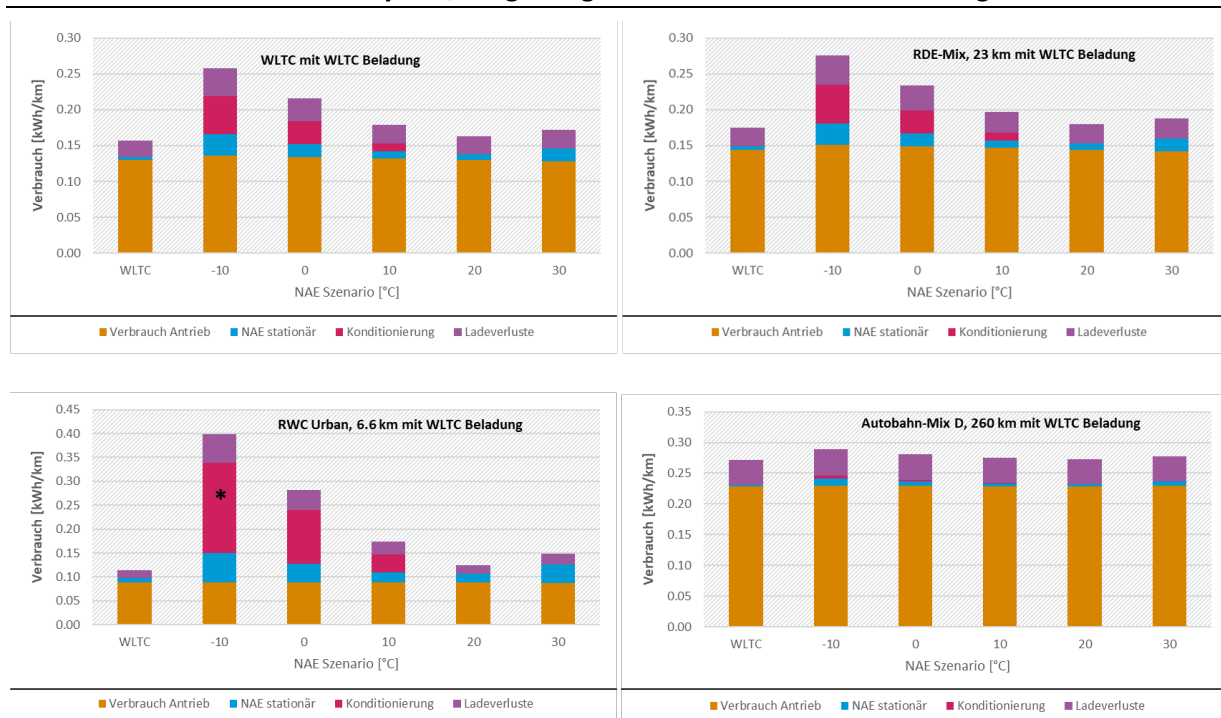
WLTC-Test bei 23°C mit NAE nach WLTC (nur die für Fahrzeugbetrieb absolut nötigen Verbraucher aktiv).

- Der Ries-RDE-Zyklus mit etwa 90 km Länge liegt bei 10°C nur 16 % über dem simulierten WLTP-Wert. Dieses Verhältnis Real-/Typprüfverbrauch passt gut zu den Ergebnissen aus Kapitel 2.2.1, wo +14 % als wahrscheinlichstes Ergebnis festgestellt wurden.

Wenn die Simulationsergebnisse die realen Verhältnisse ausreichend genau wiedergeben, könnten die Abweichungen zum Typprüfwert folgendermaßen erklärt werden:

- Die BEV werden real im Mittel auf längeren Strecken als die 23 km und/oder mit deutlich mehr als 30 % Stadtanteil gefahren. Insbesondere letzteres scheint plausibel. Die Verbrauchswerte der Stadtzyklen sind jeweils auf dem Niveau des Typprüfwertes.
- Ein deutlich höherer Anteil als die in Kapitel 2.2.1 angenommenen 50 % der spritmonitor.de Einträge gibt die Anzeige im Fahrzeug und nicht die nachgeladene Energie an. Damit würden höhere Anteile der Ladeverluste und teilweise eventuell auch der Konditionierverluste im spritmonitor.de Datensatz nicht erfasst. Der Realverbrauch könnte dann im Mittel bis zu ca. 20 % höher als der Typprüfwert sein
- Die Energieaufwendungen für Batteriekonditionierung, wie sie hier angesetzt sind, überschätzen die Realität. Da diese nur beim ersten Kaltstart des Tages in dem berechneten Umfang auftreten sollten, ist auch diese Erklärung plausibel.
- Ein Mix aus a) bis c) (wahrscheinlichste Erklärung), so dass der echte Realverbrauch im Mittel 15 bis 20 % über dem Typprüfwert liegen dürfte. Wenn Erklärung a) signifikant beiträgt, dann kann bei steigenden Anteilen von BEV in der Flotte, und damit zunehmender BEV mit „normalen Fahranteilen“ mit mehr Autobahn-km, mit steigende Abweichungen von Real- und Typprüfwert gerechnet werden. Zumindest wenn BEV dann ähnlichen Autobahnzyklen wie konventionelle PKW folgen.

Abbildung 15: Berechnete Energieverbrauchswerte für das durchschnittliche Kompakt-BEV für verschiedene Zyklen, Umgebungszustände und HVAC-Einstellungen.

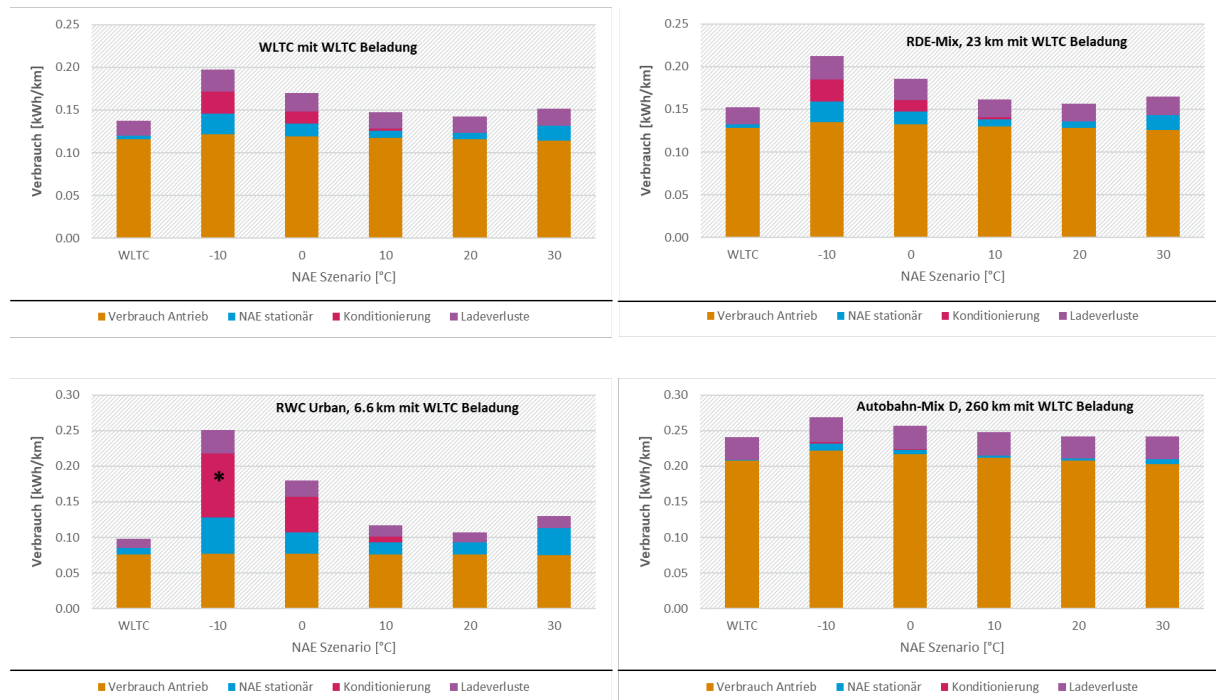


Quelle: eigene Darstellung, TU Graz

*Wert ohne Messdaten hochgerechnet, daher sehr unsicher

Die zuvor getroffenen Aussagen gelten auch für das effiziente Kompakt-BEV (Abbildung 16), jedoch auf geringerem absoluten Niveau. Im Typprüf-WLTC ist der Verbrauch ca. 12 % niedriger als der vom Durchschnitts Kompakt-BEV. Im Ries-RDE Testzyklus um 15 %.

Abbildung 16: Berechnete Energieverbrauchswerte für das „effiziente“ Kompakt-BEV für verschiedene Zyklen, Umgebungszustände und HVAC-Einstellungen.



Quelle: eigene Darstellung, TU Graz;

*Wert ohne Messdaten hochgerechnet, daher sehr unsicher

Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen die Ergebnisse in tabellarischer Form. Dabei sind die Energieverbrauchswerte für instationäre und stationäre thermische Zustände getrennt angegeben. „Instationär“ umfasst dabei das Heizen der Batterie und des Innenraums nach Fahrzeugstart entsprechend Kapitel 2.2.3.1 und 2.2.3.2. Der „stationäre NAE Verbrauch stellt den zeitlich weitgehend konstanten Leistungsbedarf der NAE bei thermisch stationärem Fahrzeugzustand dar (also bei Batterie und Fahrgastraum auf Wunschtemperatur). Der instationäre Energieverbrauch entsteht einmalig bei Fahrzeugstart, unabhängig von der Strecke, die danach gefahren wird und wird zu dem Streckenverbrauch addiert, der sich aus Antrieb und stationärem NAE-Verbrauch ergibt. Der als stationärer Leistungsbedarf angegebene Wert wird im Mittel zu jeder Zeit zwischen Start und Ende der Fahrt abgerufen.

Das „typische BEV“ nutzt hier bereits eine Wärmepumpe zum Heizen. Alternativ wird ein geringerer Massenstrom mit sehr hohem Umluftanteil im HVAC-System geheizt. Die damit schon für das typische BEV eher niedrigen stationären NAE-Leistungen wurden aufgrund der Messdaten in Kapitel 2.1 gewählt, auch weil die Realverbräuche nach [spritmonitor.de](https://www.spritmonitor.de) nur etwa 15 % über dem Typprüfwert liegen, was bereits auf effiziente NAE-Nutzung in der Flotte hinweist.

Damit wird das Reduktionspotenzial des NAE-Verbrauchs des „effizienten BEV“ gegenüber dem typischen BEV mit ca. 15 % im Jahresmittel eher niedrig angenommen. Dabei wurde eine optimierte Nutzung von Um- zu Frischluftanteilen und ein besserer Kompressor Wirkungsgrad im Klima-/Wärmepumpensystem, ein gegenüber dem typischen BEV um 10 % reduzierter Energiebedarf der anderen NAE-Verbraucher sowie eine geringere Batteriekonditionierung unterstellt.

Die wesentliche Unsicherheit in den Annahmen sind die fehlenden Messdaten zu den Massenströmen des HVAC-Systems, die daher nur geschätzt werden konnten. Wenn der Massendurchsatz bei den gemessenen BEV nur halb so hoch liegt wie angenommen, dann könnte die Effizienz der HVAC-Systeme bei gleichem Leistungsbedarf um den Faktor zwei schlechter sein. In diesem Fall läge das Optimierungspotenzial für das BEV deutlich höher. Außerdem lagen keine statistischen Daten zu Anteilen von Wärmepumpen sowie zu typischen Strategien zur Batteriekonditionierung in der BEV-Flotte vor. Daher ist auch unsicher wie weit das simulierte „typische BEV“ für den Flottendurchschnitt tatsächlich repräsentativ ist. Damit sind die Einsparpotenziale für das effiziente BEV eher eine konservative Abschätzung.

Tabelle 9: Berechnete Energieverbrauchswerte für Nicht Antriebsaggregate von-BEV für verschiedene Umgebungszustände für typische und effiziente NAE

	Typisches BEV		Effizientes BEV	
	NAE instationär (Konditionierung)	NAE stationär (dauerhaft)	NAE instationär (Konditionierung)	NAE stationär (dauerhaft)
Temp [°C]	[Wh]	[W]	[Wh]	[W]
-10	1.301	1.380	594	1.131
0	785	850	324	680
10	269	480	54	379
20	0	410	0	376
30	0	860	0	826
Jahresmittel DE	312	556	127	475

* Zusätzlicher Kühlaufwand je nach Sonneneinstrahlung für schnelle Abkühlung nach Kfz Start möglich

Zur Illustration der Einflüsse der stationären und instationären NAE-Verbräuche sind in Tabelle 10 die Verbrauchswerte für den Antrieb angegeben und darunter die Gesamtverbräuche, die sich durch Addition der stationären und instationären NAE-Verbräuche zum Antriebsverbrauch ergeben. Die Werte sind an sich gleich wie zuvor in Abbildung 15 und Abbildung 16 gezeigt. In den Grafiken wurde allerdings die Luftdichte für die jeweiligen Temperaturen verwendet, um den Luftwiderstand zu berechnen. Um die Ergebnisse in Tabelle 10 einfach nachvollziehen zu können, wurde hier für alle Temperaturszenarien dieselbe Antriebsenergie wie in der dritten Zeile verwendet, nämlich jene für eine Luftdichte bei 10°C.

Tabelle 10: Berechnete Energieverbrauchswerte für das typische und das effiziente BEV nach Antrieb und Nicht Antriebsaggregaten für verschiedene Umgebungszustände

	Typisches BEV			Effizientes BEV		
	WLTC	RWC Urban	Autobahn Mix	WLTC	RWC Urban	Autobahn Mix
Strecke [km]	23,3	6,6	260,1	23,3	6,6	260,1
v_avg [km/h]	46,5	22,3	118,9	46,5	22,3	118,9
Energie Antrieb [kWh/100km] *	13,2	8,8	23,4	11,7	7,6	21,2

	Typisches BEV			Effizientes BEV		
Summe Energie Antrieb und Nebenverbrauchern bei versch Temperaturszenarien [kWh/100km]*						
-10°C	21,7	34,9	25,0	16,7	21,8	22,4
0°C	18,4	24,6	24,4	14,6	15,6	21,9
10°C	15,3	15,1	23,9	12,8	10,2	21,5
20°C	14,0	10,7	23,7	12,5	9,3	21,5
30°C	15,0	12,7	24,1	13,5	11,3	21,9
Jahresmittel DE	15,7	16,1	24,0	13,3	11,7	21,6

* Verbrauch hier konstant für Luftdichte bei 10°C eingesetzt (in Grafiken ist Verbrauch jeweils für Luftdichte bei aktueller Temperatur gezeigt)

4.4 Vergleich HBEFA- und WLTP-Beladung

Wie zuvor beschrieben, ist die WLTP-Beladung mit 160 kg für das Kompakt-BEV niedriger als die im HBEFA 4.1 für konventionelle PKW angenommene Beladung von durchschnittlich 230 kg. Für konventionelle PKW ist im HBEFA auch ein Aufschlag für das Produkt aus Luftwiderstandsbeiwert und Frontfläche ($C_w \times A$) um 2,5 % für anteilige Fahrten mit Dachboxen und mit Anhängern hinterlegt. Der Rollwiderstandsbeiwert der konventionellen PKW wurde um 6,4 % gegenüber dem Basiswert angehoben, um anteilige Fahrten mit Winterreifen und bei nasser Fahrbahn zu berücksichtigen (Opetnik, 2019). Beide Effekte sind in den Fahrwiderständen der Typprüfung nicht berücksichtigt. Wir haben neben der Beladung also auch den Luft- und Rollwiderstand der BEV in der Variante „HBEFA-Beladung“ so angehoben, wie für konventionelle PKW im HBEFA.

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse für das Kompakt-BEV mit Beladung und Fahrwiderständen nach WLTP und nach HBEFA für den 23 km und für den 90 km RDE Mix. Zum Vergleich ist auch das Ergebnis für das effiziente BEV angegeben. Für den NAE-Verbrauch wurden in den beiden Zyklen jeweils die für den Jahresmix Deutschland berechnete Werte vorgegeben. Das „WLTP“-Ergebnis stellt jeweils den berechneten Typprüfwert für die beiden BEV-Varianten dar, also mit WLTP-Beladung und den WLTP-NAE-Verbrauchswerten.

Die höheren Beladungen sowie Fahrwiderstände im HBEFA-Setting erhöhen die Realverbräuche um ca. 3,5 %. Wegen der Rekuperation von Bremsenergie ist der Effekt etwas geringer als für konventionelle PKW. Im Jahresmittel der Klimamatrix Deutschland ergeben sich im HBEFA-Setting für das Durchschnitts-Kompakt-BEV im 90 km RDE Zyklus 163 Wh/km. Der Anteil stationärer und instationärer NAE-Verbraucher ist in Summe 8 %.

Abbildung 17: Berechnete Energieverbrauchswerte für „normales“ und „effizientes“ Kompakt-BEV mit verschiedenen Beladungs- und Fahrwiderstandsettings im Klimamix Deutschland

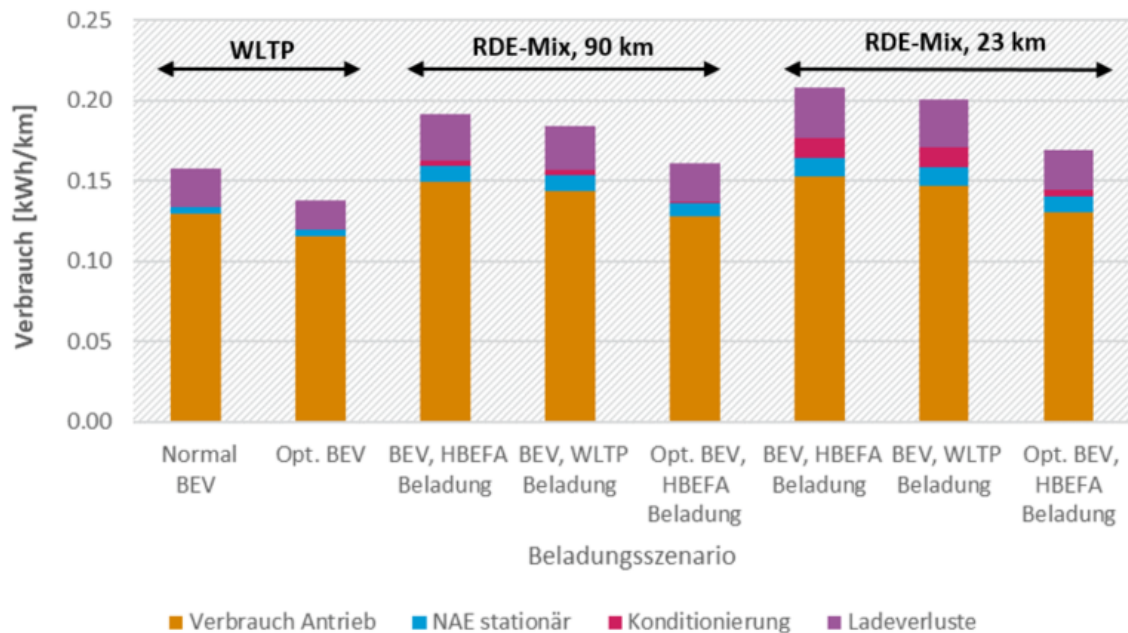
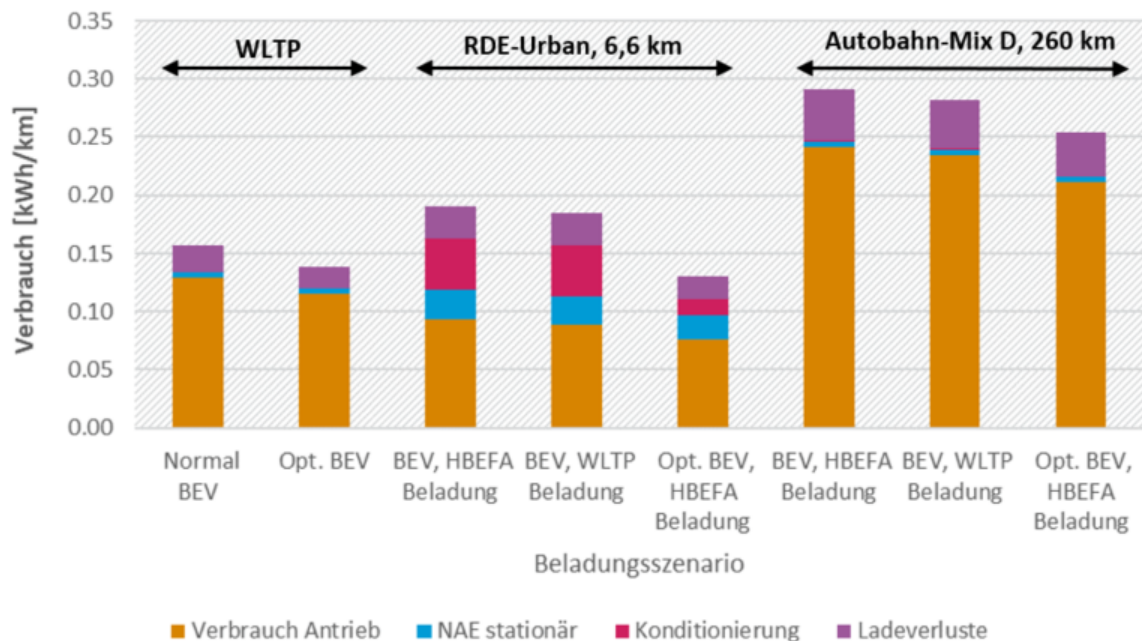


Abbildung 18 vergleicht analog zu Abbildung 17 den Innerorts RDE-Mix und den Autobahnzyklus. Im Klimamix Deutschland hat das mittlere Kompakt-BEV im kurzen Stadtzyklus Energieverbrauchsanteile für instationäre Konditionierung von 27 % und für stationäre NAE-Verbraucher von 15 % (jeweils bezogen auf den Verbrauch ohne Ladeverluste). Im Autobahnzyklus ergibt sich ein NAE-Anteil von nur 2 %. Der Mehrverbrauch durch HBEFA-Beladung und Fahrwiderstände ist jeweils knapp über 3 %.

Abbildung 18: Berechnete Energieverbrauchswerte für „normales“ und „effizientes“ Kompakt-BEV mit verschiedenen Beladungs- und Fahrwiderstandsettings im Klimamix Deutschland



5 Vorschläge zur Überarbeitung des WLTP und der Verbrauchskennzeichnungen für BEV

5.1 Aktuelle Berücksichtigung von NAE-Verbrauchern im WLTP

Aktuell werden alle offiziellen Angaben zum Verbrauch von PKW durch das WLTP-Verfahren (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) nach EU Verordnung (EU) 2017/1151 ermittelt. Dem WLTP-Verfahren liegt der Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) zugrunde. Der WLTC geht dabei über eine Strecke von 23,3 km und hat eine mittlere Geschwindigkeit von 46,5 km/h. Für die Ermittlung des Energieverbrauches von BEV wird eine erweiterte Form des WLTC, der PEV Type 1 Test, verwendet (siehe auch Kap. 2.1.1).

Relevant für den angegebenen Verbrauch nach WLTP sind dabei wiederum die beiden WLTC-Elemente des gesamten Entladungstests. Das Geschwindigkeitsprofil des WLTC bildet im Gegensatz zum vorherigen Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) dynamisches Fahren ab und erreicht Spitzengeschwindigkeiten von etwa 130 km/h. Es handelt sich dennoch um einen Test auf dem Rollenprüfstand und die Abbildung des realen Verbrauchsverhaltens bleibt eingeschränkt. Bereits aufgrund unterschiedlicher Fahrprofile können die realen Energieverbräuche deshalb von den im WLTP ermittelten Werten abweichen.

Neben den Verbrauchsunterschieden durch unterschiedliche Fahrprofile können auch die NAE-Verbraucher zu Abweichungen zwischen WLTP- und Realverbrauch führen. So werden die für den Fahrbetrieb elementaren NAE-Verbraucher im WLTP zwar prinzipiell erfasst (z.B. Tagfahrlicht, Steuergeräte, Sensoren und Bremskraftverstärker), die Lenkhilfe bleibt aufgrund fehlender Lenkbewegungen beim Rollenprüfstand jedoch deutlich unterrepräsentiert. Einige dieser NAE-Verbraucher werden zudem mit der 12 V-Batterie betrieben. Da die Energiebilanz der 12 V-Batterie bei dem PEV Type 1 Test nicht ausgeglichen sein muss, können auch diese Verbraucher im WLTP nicht vollständig erfasst sein.

Zudem werden wichtige Verbraucher, vor allem die Klimaanlage, aber z.B. auch Scheinwerfer, Entertainment und Sitzheizungen, nicht erfasst. Bei Elektroautos bleibt bei der vorgeschriebenen Prüftemperatur von 23 Grad auch die Batterietemperierung wahrscheinlich unberücksichtigt, da sich die Batterie bereits nahe der optimalen Betriebstemperatur befindet. Ladeverluste sind dagegen im Messverfahren enthalten und werden mit einem genormten Batterie-Entleerungstest bestimmt (siehe Kapitel 2.1.1). Es handelt sich voraussichtlich jedoch um Idealwerte, da der Hersteller eine optimale Ladestrategie wählen darf.

Neben der Verwendung bei der Typzulassung sind die mittels WLTP erfassten Verbrauchsangaben auch Grundlage der Verbraucherinformationen. Diese werden in Deutschland durch die PKW-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung (PKW-EnVKV) geregelt, die Kraftstoffverbrauch, CO₂-Emissionen und Stromverbrauch neuer PKW umfasst. Die PKW-EnVKV basiert dabei auf der Europäischen Richtlinie 1999/94 (Bereitstellung von Verbraucherinformationen über Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen beim Marketing neuer Personenkraftwagen). Die EU-Richtlinie 1999/94 stellt sicher, „... dass die Verbraucher Informationen über den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen von neuen Personenkraftwagen, die in der Union zum Kauf oder Leasing angeboten werden, erhalten und so beim Kauf eines Neuwagens ihre Entscheidung in voller Sachkenntnis treffen können.“

Die PKW-EnVKV verpflichtet Hersteller und Händler Angaben über den Energieverbrauch als so genanntes „PKW-Label“ am Fahrzeug anzubringen sowie einen Aushang mit allen vor Ort erhältlichen PKW-Modellen am Verkaufsort zu verwenden. Auch müssen die Angaben zum

Energieverbrauch und zu den CO₂-Emissionen in die Fahrzeugmodell-Werbung in Printmedien und in elektronischer Form verbreitetes Werbematerial integriert werden.

Die deutsche Umsetzung des PKW-Label nutzt dabei eine farbige Effizienzskala in Anlehnung an die bereits geläufige Form der Kennzeichnung bei Haushaltsgeräten und enthält auch Angaben zu den Energiekosten und der Jahressteuer, die ebenfalls auf die mittels WLTP ermittelten Verbrauchswerten beruhen. Die Einordnung in die Effizienzklassen erfolgt auf Basis eines relativen Berechnungssystems auf Grundlage der CO₂-Emissionen unter Berücksichtigung der Fahrzeugmasse.

5.2 Relevanz unberücksichtigter NAE-Verbraucher

Die Auswertungen in Kapitel 2 haben gezeigt, dass der Realverbrauch von BEV im Bereich von etwa 18 kWh/100 km liegt und damit im Mittel etwa 15 % über den im WLTP gemessenen Werten. Ergänzende Simulationen in Kapitel 2 und 4 zeigen, dass der Anteil der NAE-Verbraucher am Gesamtenergieverbrauch dabei etwa zwischen 1 % (auf langen Autobahnstrecken bei ca. 20°C) und 65 % (kurze Stadtfahrt bei -10°C mit Kaltstart) liegt. Im Durchschnitt für das deutsche Klima dürfte der Anteil der NAE etwa bei 10 % bis 20 % des Gesamtverbrauchs liegen, wobei etwa ein Drittel dieses NAE-Verbrauchs auf die Konditionierung der Batterie und des Fahrgastraumes nach Kaltstarts entfallen dürfte. Im WLTC wurde zum Vergleich ein Anteil von ca. 3,3 % berechnet. Ähnliche Werte ergeben sich auch durch eine differenzierte Aufstellung der NAE-Verbraucher auf Basis der Literatur (siehe Kapitel 3.2).

Insgesamt tragen die NAE-Verbraucher demnach voraussichtlich mindestens 10 % zum realen Gesamtenergieverbrauch bei. Unsicherheiten gibt es bezüglich des Einflusses der Batterietemperierung, die bei niedrigen Umgebungstemperaturen zumindest temporär deutlich verbrauchssteigernd wirken kann. Der Anteil der im WLTP angeschalteten NAE-Verbraucher beträgt nach der Literaturauswertung knapp 3 % und stützt damit die simulierten Werte.

Im Jahresmittel tragen die im WLTP noch nicht berücksichtigten NAE-Verbraucher damit merklich zum Gesamtverbrauch bei. Die Schwankungen sind jedoch insbesondere bei der Klimatisierung erheblich (siehe Kapitel 3.3). Während die Gesamtverbrauchswerte bei 20 Grad Umgebungstemperatur nach den Literaturangaben im Bereich von 15 kWh/100 km liegen, können diese insbesondere bei sehr kalten Temperaturen (- 20 Grad) bis auf das doppelte ansteigen. Bereits bei 0 Grad zeigt sich aber schon ein deutlich erhöhter Verbrauch im Bereich von 20 bis 25 kWh pro 100 km. Auch bei hohen Temperaturen steigt der Verbrauch deutlich an und liegt bei 30 Grad bei 20 kWh/100 km, bei 40 Grad sogar bei bis zu 25 kWh/100 km. Insgesamt führen kalte Außentemperaturen jedoch noch zu einer deutlicheren Erhöhung des Verbrauchs als warme Umgebungsbedingungen.

Die Daten lassen dabei vermuten, dass einige Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs bereits heute verbreitet eingesetzt werden, wie z.B. eine Wärmepumpe zum Heizen. Darauf deutet unter anderem der im Mittel dann doch begrenzte Mehrverbrauch von 15 % im Realbetrieb gegenüber dem WLTP hin. Es wird also wahrscheinlich auch zukünftig eine relevante Diskrepanz zwischen dem Verbrauch im WLTP und auf der Straße bestehen, was für eine Anpassung des WLTP spricht, um diese Lücke zu schließen.

Es lagen jedoch keine statistischen Daten zur Verbreitung von Wärmepumpen sowie zu typischen Strategien zur Batteriekonditionierung in der BEV-Flotte vor, so dass das weitere Optimierungspotenzial unsicher ist. Die Bandbreite der Daten zeigt dabei, dass Optimierungstechnologien wahrscheinlich immer noch nicht durchgängig eingesetzt werden. Dies spricht wiederum für Maßnahmen, um effiziente Technologien verstärkt am Markt

durchzusetzen. So wurde das Reduktionspotenzial der NAE-Verbraucher selbst konservativ im Bereich von 15 % abgeschätzt.

Die Ladeverluste liegen nach der Literaturlauswertung im Mittel bei 17,5 % und sind damit sehr relevant. Diese sind zwar im WLTP prinzipiell enthalten, jedoch unter idealisierten Bedingungen. Abweichungen davon in der Praxis können also zu deutlich höheren Realverbräuchen führen. Übereinstimmend zeigen die Studien z.B. einen schlechteren Wirkungsgrad im Bereich niedriger Ladeleistungen (kleiner 6 kW) und insgesamt liegen die Werte in einer Bandbreite von 10 % bis 26 %. Neben der Ladeleistung kann auch die Umgebungstemperatur relevant sein. So zeigt der Wirkungsgrad bei -15°C eine Spannbreite zwischen 62 % und 89 % und bei +40°C zwischen 77 und 90 %.

Zusammengefasst wären gegenüber dem heute angegebenen WLTP-Verbrauch als entscheidende Informationen für die Käufer vor allem folgende Daten hilfreich:

- ▶ Der Verbrauch bei kalten Startbedingungen und kurzen Strecken für Käufer in Deutschland oder in ähnlichen klimatischen Bedingungen.
- ▶ Die realen Ladeverluste des Kfz bei niedriger Temperatur und Leistung (z.B. 2 Phasiger Wechselstrom) und, falls relevant, bei hoher Leistung.
- ▶ Der Verbrauch bei hohen Starttemperaturen für Käufer in südlicheren EU Ländern.

Die zusätzliche Berücksichtigung dieser Aspekte würde die Lücke zum Realverbrauch vermutlich weitgehend schließen.

5.3 Zentrale Handlungsfelder und Lösungsansätze für eine Überarbeitung des WLTP

Ziel für eine Überarbeitung des WLTP ist eine realitätsnähere Abbildung der Verbräuche von BEV-PKW. Dabei wird durch die Integration bisher unberücksichtigter NAE-Verbraucher auch ein Anreiz für die Hersteller geschaffen, diese effizienter zu gestalten. Hier bestehen Einzelpotenziale auf Komponentenebene und auch Optimierungsmöglichkeiten durch die Vernetzung der Komponenten und Regelungsstrategien zur Heizung und Kühlung des Innenraums und der Batterie.

Die zentralen Handlungsfelder zur Integration weiterer NAE-Verbrauchern in den WLTP sollten folgenden Kriterien entsprechen:

- ▶ Relevanter Leistungsbedarf (durchschnittlich mindestens 20 W)
- ▶ Unzureichende Berücksichtigung im WLTP
- ▶ Standardausstattung in Fahrzeugen
- ▶ Relevante Nutzungszeiten

Vor diesem Hintergrund ist insbesondere die (realitätsnähere) Abbildung von Klimatisierung, Batterietemperatur und Ladeverlusten von Bedeutung. Weitere Verbraucher haben nach den bisherigen Recherchen einen deutlich niedrigeren mittleren Leistungsbedarf oder sehr kurze Nutzungszeiten. Wahrscheinlich einfach zu integrieren wären hier noch die Scheinwerfer. Diese sind bisher unberücksichtigt, könnten aber prinzipiell während des Rollentests eingeschaltet bleiben. Damit würde jedoch eine Überschätzung deren Real-Verbrauchs entstehen. Alternativ bietet sich eine zeitweise Anschaltung (z.B. in einem der beiden WLTC-Zyklen) an.

Der Energieverbrauch der Lenkhilfe kann dagegen am Prüfstand prinzipiell nicht sinnvoll erhoben werden, da dort keine Lenkbewegungen notwendig und möglich sind. Auch Sitz- oder Lenkradheizung können prinzipiell (zumindest saisonal) relevante Verbraucher sein, sind aber keine Standardausstattung und können auch positive Effekte auf die Klimatisierung haben, da eine sehr zielgerichtete Erwärmung der Passagiere erfolgt.

Klimatisierung und Batterietemperierung

Demgegenüber ist die Klimatisierung der größte NAE-Verbraucher, der zudem im WLTP komplett unberücksichtigt bleibt. Dabei ist die Kühlung nur schwer im Rollentest realitätsnah zu messen. Neben der Umgebungstemperatur hat hier insbesondere die Solarstrahlung einen großen Einfluss. Diese könnte wohl nur durch Strahler simuliert werden, allerdings müssten dafür Strahler bezüglich Intensität, Spektrum und Fläche normiert werden, da in Kfz Solarsensoren integriert sind, deren Signal in die Regelstrategie der Klimaautomatik einfließt. Alternativ oder zusätzlich wäre ein zusätzlicher Rollentest ohne Solarstrahler, aber bei höherer Temperatur als 23 Grad möglich, z.B. bei 30 Grad mit einer geforderten Innenraumtemperatur von z.B. 20 Grad. Die erforderliche Kühlleistung entspräche ohne die Solarstrahlung zwar nicht einem entsprechenden Sommertag, die Effizienz der Klimaanlage wäre aber näherungsweise abgebildet.

In einem für die EU-Kommission von der TUG entwickelten Testverfahren für Klimaanlage (Hausberger, 2013) zeigte sich z.B. in Ringversuchen, dass eine lange Vorkonditionierung des Kfz am Prüfstand sowie betriebswarme Fahrzeuge und konstante Fahrzustände notwendig sind, um wiederholbare Werte für den NAE-Verbrauch zu erzeugen. Ursache sind der relativ geringe Zusatzverbrauch durch die Klimaanlage im Vergleich zu anderen Veränderungen im Test und der dabei große Einfluss der Bauteiltemperaturen und der Prüfstandbedingungen (Temperatur, Feuchte, Beleuchtung) auf den Klimaanlagenbetrieb.

Damals war das Ziel allerdings, den Verbrauch der Klimaanlagen konventioneller PKW getrennt zu messen und zu regulieren, da zu dieser Zeit gerade erst Flottenzielwerte für den NEDC ohne aktive Klimaanlage vereinbart waren. Dabei wurde der Verbrauch der Klimaanlage durch Differenzbildung eines Tests mit eingeschalteter Klimaanlage zu dem gleichen Test mit inaktiver Klimaanlage bestimmt. Dabei haben alle Schwankungen im Gesamtverbrauch natürlich hohen Einfluss auf die berechnete (kleine) Differenz der beiden Messergebnisse.

Will man den Gesamtverbrauch inklusive Klimaanlage messen, wäre die Wiederholbarkeit wahrscheinlich deutlich besser. Als Herausforderung bliebe dennoch, die Testbedingungen zu definieren und in einer Typprüfung zu kontrollieren. Fahrzeugseitig müsste aus heutiger Sicht die Klimaautomatik aktiviert sein, auch wenn Nutzer manuell andere Einstellungen wählen können. Eine Kontrollmöglichkeit, dass die Klimaautomatik am Prüfstand gleich regelt wie im realen Fahren müsste dafür erarbeitet werden. Andernfalls könnte am Prüfstand der Massenstrom geringer und die Temperatur höher geregelt werden (z.B. wenn keine Solarstrahlung oder Fahrzeugbeschleunigung gemessen wird). Für den eher geringen Energiebedarf der Klimatisierung der PKW in mitteleuropäischem Klima erscheint dieser Aufwand eher hoch. Der Anteil für EU 27 Klimabedingungen wurde hier nicht ermittelt.

Die Auswertungen in Kapitel 3.3.2 und 4 haben jedoch auch gezeigt, dass in Deutschland vor allem die Heizung einen hohen zusätzlichen Energieverbrauch haben kann. Der Heizbedarf ließe sich bei einem entsprechenden Kältetest z.B. bei 0 Grad recht gut am Prüfstand abbilden. Ein solcher Test würde zugleich ggf. auch eine Batterietemperierung mit abbilden. Die Leistungsbedarfe für Batterieheizen treten in der Regel nur kurzfristig auf und können gleichzeitig auch positive Effekte auf die Leistungsfähigkeit sowie Lebensdauer der Batterie und die thermischen Verluste in der Batterie haben. Ein zusätzlicher Test, z.B. WLTC bei 0°C

Kaltstart, würde Anreiz zu weitergehenden Optimierungen des Thermomanagements schaffen und das Ergebnis wäre als Kundeninformation relevant. Auch hier müsste wieder eine Methode zur Überprüfbarkeit der realitätsnahen Regelung geschaffen werden, da die Effekte auf die Lebensdauer der Batterie und den Fahrerkomfort im realen Betrieb ganz wesentliche Regelgrößen sind, in einem Rollentest aber keine Relevanz haben.

Ladeverluste

Schlussendlich sind bei BEV auch die Ladeverluste mit durchschnittlich 17,5 % sehr relevant. Hier haben sich vor allem Abhängigkeiten von der Ladeleistung gezeigt (siehe Kapitel 3.3.3). Die Höhe der Verluste hängt vor allem von den im Kfz integrierten Spannungs- und Wechsel-/Gleichstromwandlern ab. Da Ladeverluste bisher im WLTP nur unter idealen Bedingungen enthalten sind (22 kW oder andere/effizientere Ladeleistung nach Wahl der Hersteller), könnten hier ggf. Messungen bei anderen oder mehreren (insbesondere niedrigen) Ladeleistungen sinnvoll sein.

Die fahrzeugspezifischen Werte zeigen, dass die Hersteller Bordladegeräte mit einem hohen Wirkungsgrad entwickeln können. Eine Verpflichtung der Hersteller ihrerseits die Ladeverluste bei den technischen Angaben mitaufzuführen würde den Anreiz erhöhen effizientere Bordladegeräte in den Fahrzeugen einzusetzen. Auch thermische Abhängigkeiten wurden festgestellt. Die großen Bandbreiten zeigen, dass hier Optimierungspotenzial besteht. Höhere thermische Verluste bei niedrigen Temperaturen könnten jedoch ebenfalls durch einen Kältetest erfasst werden.

Fraglich ist aber, ob Laden bei kalter Batterie in der Realität häufig auftritt. Bei Ladung direkt nach einem Kältetest wäre die Batterie bereits weitgehend erwärmt. Inwieweit anschließend noch ein relevanter Energieverbrauch zum Warmhalten der Batterie während des Ladevorganges auftritt, konnte noch nicht ermittelt werden. Bei niedrigen Ladeleistungen könnte die Batterie tatsächlich auskühlen, hätte aber dennoch wenig Verluste und könnte mit der geringen Leistung auch laden. Inwieweit niedrige Ladeströme und kalte Batterien einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer haben, ist nicht bekannt. Bei hohen Ladeleistungen würden die Ladeverluste ein schnelles Auskühlen verhindern.

5.4 Handlungsoptionen und Messbedarf für eine Erweiterung des WLTP

Vor dem Hintergrund des großen Aufwands der mit einer Erweiterung bzw. Anpassung des WLTP, sowohl im politischen Prozess als bei den Messungen für die Typzulassung, verbunden ist, sollten zunächst Handlungsoptionen ohne Änderung des WLTP geprüft werden. Hier sind Anreizwirkungen zum Einsatz effizienter Technologie von transparenten Verbraucherinformationen zu unterscheiden. Effiziente Technologien lassen sich ggf. auch direkt über Ökodesignanforderungen für BEV-Ladegeräte oder Vorgaben für die Effizienz der Klimatisierung durchsetzen. So wurde für Ladegeräte bereits seitens der Europäischen Kommission im Arbeitsprogramm für Ökodesign und Energieverbrauchskennzeichnung festgestellt, dass es sinnvoll ist, „... Anforderungen festzulegen, bevor große Mengen potenziell ineffizienter Ladegeräte installiert werden“ (Europäische Kommission 2022). Separate Tests für Klimaanlage sind dagegen mit eher hohem Aufwand verbunden (siehe oben) und würden dann auch separate Messungen erfordern. Bezüglich transparenter Verbraucherinformationen könnten zumindest die Ladeverluste bereits aus den heute gemessenen Typgenehmigungsdaten bestimmt werden und könnten so ohne weitere Messungen separat, z.B. im sogenannten PKW-Label, dargestellt werden.

Zentral für eine realitätsnähere Abbildung des Verbrauchs von BEV ist jedoch die Erfassung des Verbrauchs bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, insbesondere kalten Temperaturen.

Für PKW mit Ottomotoren ist in der Typprüfung ein WLTC Testzyklus bei -7°C zu messen um die Kaltstartemissionen dieser Fahrzeuge zu prüfen (Typ 6 Test im WLTP nach Regulierung (EU) 2017/1151). Um Verbrauch und CO₂-Emissionen konventioneller PKW bei mittlerer Europäischer Temperatur zu bestimmen, ist für je ein Kfz einer Familie ein ATCT (Ambient Temperature Correction Test) bei 14°C vorgeschrieben. Mit diesem Test wird der Mehrverbrauch gegenüber dem Standard Test bei 23°C ermittelt.

Bei BEV werden solche Tests bisher nicht standardmäßig durchgeführt und müssten analog zu konventionellen PKW als Zusatztest eingeführt werden. Da der Heizenergiebedarf bei BEV unter 14°C überproportional zunehmen kann, dürfte ein Test z.B. bei 0°C aussagekräftiger sein als ein 14°C Test. Wenn nach dem 0°C Test auch mit anderer Leistung geladen werden müsste, könnten durch den einen Zusatztest gleichzeitig Daten zu den Ladeverlusten bei zwei verschiedenen Ladesystemen gewonnen werden. Z.B. könnte der zweite Ladevorgang mit der maximal vom Kfz unterstützten Leistung erfolgen. Prinzipiell könnte analog zu Otto-Pkw auch ein - 7°C Test übernommen werden. Für den deutschen Winter werden jedoch 0°C als repräsentativer angesehen und sind weniger aufwendig in der Vorkonditionierung.

Würden Daten bei einer solchen Temperatur standardmäßig erfasst, könnten diese differenziert berichtet (PKW-Label) und/oder auch in einem gewichteten mittleren Verbrauchswert berücksichtigt werden. Empirische Daten zur realitätsnahen Wichtung zwischen 0 Grad-, 23 Grad- und ggf. auch 30 Grad-Test müssten dafür entsprechend ausgewertet werden. Zusätzlich wäre auch die Kommunikation der einzelnen Werte im Rahmen des PKW-Label sinnvoll. Dies könnte analog der differenzierten Verbrauchswerte erfolgen (innerorts, außerorts, kombiniert). Darüber hinaus bietet das PKW-Label auch die Möglichkeit, zusätzlich erfasste Verbrauchswerte und Ladeverluste unter anderen Bedingungen (Ladeleistung, Umgebungstemperatur) zunächst NUR informatorisch zu verwenden, also im Sinne eines Monitorings.

Abschließend kann festgestellt werden, dass wahrscheinlich auch zukünftig eine relevante Diskrepanz zwischen dem Verbrauch im WLTP und auf der Straße bestehen wird. Die Lücke wird maßgeblich durch die Klimatisierung bestimmt, die derzeit nicht in Typprüfmessungen erfasst wird. Daher können transparente Verbraucherinformationen, die auch diesen Beitrag beinhalten sollen, wahrscheinlich nur durch zusätzliche Messungen im Rahmen des WLTP erreicht werden. Bevor diese Forderung politisch intensiv verfolgt wird, empfiehlt sich jedoch die Messungen einiger BEVs im WLTP bei 23°C und bei 0°C, um belastbarere Daten als Argumentationsgrundlage zu schaffen. In diesem Zusammenhang könnte auch ein Vorschlag für den Test Ablauf und die Auswertung ausgearbeitet werden.

Die Bandbreite der Daten und die Abschätzung eines optimierten BEV im Rahmen der Studie zeigt dabei auch, dass Optimierungstechnologien wahrscheinlich noch nicht durchgängig eingesetzt werden. Auch dies könnte mit einem Kältetest im WLTP erreicht werden. Geht es aber allein um den Einsatz der Technologien und nicht um die transparente Verbraucherinformation können hier ggf. auch Alternativen geprüft werden, die direkte Vorgaben machen (z.B. über die Ökodesignrichtlinie).

6 Quellenverzeichnis

- ADAC (2021): Stromverbrauch von Sitzheizung und Co.: Wie hoch ist er tatsächlich?
<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/sitzheizung-verbrauch/>.
 (29.09.2022).
- Apostolaki-Iosifidou, E.; Codani, P.; Kempton, W. (2017): Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. In: Energy. Vol. 127, S. 730–742.
- Busl, M. (2011): Design of an Energy-Efficient Climate Control Algorithm for Electric Cars.
- Deng, B.; Li, L.; Ou, Y.; Wang, Y.; Zhao, Z.; Meng, Z.; Zhou, Q. (2021): Study on Environmental Adaptability of Electric Vehicle based on WLTC cycle. In: Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1948, No. 1, S. 012087.
- Erbe, C. (2020): ADAC ermittelt bis zu 25 Prozent mehr an realen Stromkosten.
<https://presse.adac.de/meldungen/adac-ev/technik/ladeverlust.html>. (04.10.2022).
- Evtimov, I.; Ivanov, R.; Sapundjiev, M. (2017): Energy consumption of auxiliary systems of electric cars. In: MATEC Web of Conferences. Vol. 133, S. 06002.
- Europäische Kommission (2022): Arbeitsprogramm für Ökodesign und Energieverbrauchskennzeichnung 2022-2024. Brüssel.
- Genovese, A.; Ortenzi, F.; Villante, C. (2015): On the energy efficiency of quick DC vehicle battery charging. In: World Electric Vehicle Journal. Vol. 7, No. 4, S. 570–576.
- Hamwi, H.; Rushby, T.; Mahdy, M.; Bahaj, A. S. (2022): Effects of High Ambient Temperature on Electric Vehicle Efficiency and Range: Case Study of Kuwait. In: Energies. Vol. 15, No. 9, S. 3178.
- Hao, X.; Wang, H.; Lin, Z.; Ouyang, M. (2020): Seasonal effects on electric vehicle energy consumption and driving range: A case study on personal, taxi, and ridesharing vehicles. In: Journal of Cleaner Production. Vol. 249, S. 119403.
- Hausberger, S. (2003): Simulation of Real World Vehicle Exhaust Emissions; VKM-THD Mitteilungen; Heft/Volume 82; Verlag der Technischen Universität Graz; ISBN 3-901351-74-4
- Hausberger, S.; Rexeis, M.; Luz, R. (2012): New Emission Factors for EURO 5 & 6 Vehicles, 19th International Conference „Transport and Air Pollution“, 26. – 27.11.2012, Thessaloniki
- Hausberger, S.; Rexeis, M.; Luz, R. (2011): PHEM das Modell der TU Graz zur Berechnung von Kfz-Emissionen und seine Datenbasis bei Euro 5 und Euro 6, Fachtagung Emissionen und Minderungspotenziale im Verkehrsbereich, Stuttgart, 21.07.2011
- Hausberger, S.; Rexeis, M.; Zallinger, M.; Luz, R. (2009): Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3. Report Nr. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679
- Hausberger, S.; Stadlhofer, W.; Vermeulen, R.; Geivanidis, S. et.al. (2013): MAC performance test procedure; Co-ordination of the pilot test phase and follow up towards the drafting of the regulatory text; Performed under Framework Service Contract ENTR/05/18, European Commission - DG Enterprise and Industry
- Kieldsen, A.; Martinenas, S.; Sørensen, T. M. (2016): Efficiency Test Method for Electric Vehicle Chargers. S. 11.
- Kruppok, K.; Jäger, B.; Kriesten, R. (2016): Auswirkung der Elektrifizierung von Nebenverbrauchern auf das Energiemanagement im Kraftfahrzeug. S. 4.
- Łebkowski, A. (2017): Temperature, Overcharge and Short-Circuit Studies of Batteries used in Electric Vehicles. In: PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. Vol. 1, No. 5, S. 69–75.
- Li, J.; Zhu, Z. (2014): Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles. S. 79.

- Liu, K.; Wang, J.; Yamamoto, T.; Morikawa, T. (2018): Exploring the interactive effects of ambient temperature and vehicle auxiliary loads on electric vehicle energy consumption. In: Applied Energy. Vol. 227, S. 324–331.
- Lohnauer, L. (2019): Einfluss von Anbauteilen und Umgebungsbedingungen auf Real Drive Emission Ergebnisse; Masterarbeit am ITnA der TU Graz
- Luz, R.; Hausberger, S. (2013): User Guide for the Model PHEM, Version 11.2; Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics TU Graz
- Matzer, C.; Hausberger, S.; Lipp, S.; Rexeis, M. (2016): A new approach for systematic use of PEMS data in emission simulation; TAP conference 2016; Lyon, France
- Matzer, C.; Weller, K.; Opetnik, M.; Hausberger, S. et al. (2020): Feldüberwachung von Kraftfahrzeugen und Aktualisierung des HBEFA; Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamts Deutschland; Forschungskennzahl 3715 51 1020
- Miri, I.; Fotouhi, A.; Ewin, N. (2021): Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study. In: International Journal of Energy Research. Vol. 45, No. 1, S. 501–520.
- Moritz, G.: Messung und Simulation eines Elektrofahrzeugs im Realbetrieb; Bachelorarbeit am ITnA der TU Graz
- Notter, B. (Infras); Weller, K.; Hausberger, S.; Matzer, C.; Dippold, M et.al. (2021): Weiterentwicklung HBEFA 4.2, Abschlussbericht, im Auftrag des Umweltbundesamtes Deutschland, Berichtsnummer FVT-073/2021/Wel EM-17/27/6930
- Opetnik, M. (2019): Messung und Simulation von Otto-PKW Emissionen für das Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Masterarbeit, Technische Universität Graz
- Otto, T. (2021): Ladeverluste bei Elektroautos | Praxis-Elektroauto.de. <https://www.praxis-elektroauto.de/wissen/l/ladeverluste.html>. (04.10.2022).
- Patrone, G. L.; Paffumi, E.; Otura, M.; Centurelli, M.; Ferrarese, C.; Jahn, S.; Brenner, A.; Thieringer, B.; Braun, D.; Hoffmann, T. (2022): Assessing the Energy Consumption and Driving Range of the QUIET Project Demonstrator Vehicle. In: Energies. Vol. 15, No. 4, S. 1290.
- Peng, Q.; Du, Q. (2016): Progress in Heat Pump Air Conditioning Systems for Electric Vehicles—A Review. In: Energies. Vol. 9, No. 4, S. 240.
- Politschnig, N. (2022): Bestimmung von Energieverbrauch und motorischen sowie nicht-motorischen Emissionen von PKW; Masterarbeit am ITnA der TU Graz
- Rathberger (2021): Modern VTM System Architectures An Overview.
- Reick, B.; Konzept, A.; Kaufmann, A.; Stetter, R.; Engelmann, D. (2021): Influence of Charging Losses on Energy Consumption and CO2 Emissions of Battery-Electric Vehicles. In: Vehicles. Vol. 3, No. 4, S. 736–748.
- Rexeis, M. (2009): Ascertainment of Real World Emissions of Heavy Duty Vehicles. Dissertation, Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology
- Schiechl, C.: Messung und Simulation eines Elektrofahrzeuges unter Realbedingungen; Bachelorarbeit am ITnA der TU Graz
- Suchanek, A. (2018): Energiemanagement-Strategien für batterieelektrische Fahrzeuge. S. 189.
- Trentadue, G.; Lucas, A.; Otura, M.; Pliakostathis, K.; Zanni, M.; Scholz, H. (2018): Evaluation of Fast Charging Efficiency under Extreme Temperatures. In: Energies. Vol. 11, No. 8, S. 1937.
- VARTA (2019): Electrical consumers in cars - how much power do they use? <https://batteryworld.varta-automotive.com/en-gb/electrical-consumers-in-cars-how-much-power-do-they-use>. (29.09.2022).

Weustenfeld, T.; Köhler, J.; Brabetz, L. (2017): Heiz- und Kühlkonzept für ein batterieelektrisches Fahrzeug basierend auf Sekundärkreisläufen. Audi-Dissertationsreihe Cuvillier Verlag, Göttingen.

Yang, B.; Yao, M.; Li, X.; Wang, M.; Wei, D.; Li, G. (2021): Impact of Thermal Architecture on Electric Vehicle Energy Consumption/Range: A Study with Full Vehicle Simulation. S. 2021- 01–0207.

Zallinger, M. (2010): Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen. Dissertation, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz