

Malte Westerloh

Analyse des weltweiten Energiebedarfs zum Heizen und Kühlen von Elektrofahrzeugen

AutoUni – Schriftenreihe

Band 138

Reihe herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Reihe herausgegeben von/Edited by

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

Malte Westerloh

Analyse des weltweiten Energiebedarfs zum Heizen und Kühlen von Elektrofahrzeugen

Mit einem Geleitwort von Holger Großmann

 Springer

Malte Westerloh
AutoUni
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2019

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe
ISBN 978-3-658-26043-9 ISBN 978-3-658-26044-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-26044-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Analyse des weltweiten Energiebedarfs zum Heizen und Kühlen von Elektrofahrzeugen

Bei der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Malte Westerloh
aus (Geburtsort): Würzburg

eingereicht am: 20. Mai 2018
mündliche Prüfung am: 01. Februar 2019

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler
Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer

2019

Geleitwort

Für heutige elektrisch betriebene Pkw (BEV, Battery Electric Vehicle) werden Verbrauchsangaben gemäß dem Fahrzyklus WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) ermittelt. Der Einfluss der Klimaanlage (HVAC, Heating Ventilation Air Conditioning) wird dabei nicht berücksichtigt, obwohl die Reichweite im realen Fahrbetrieb signifikant davon abhängt: Im Jahresmittel ergibt sich bei den klimatischen Bedingungen in Deutschland für BEV der Kompaktklasse z.B. ein Verlust an Reichweite von ca. einem Viertel, im Extremfall fällt diese sogar um die Hälfte bei einer Außenlufttemperatur von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dies zeigt die starke Abhängigkeit des Energieaufwandes für die Klimatisierung vom lokalen Klima. Daher sind detaillierte Analysen für die weltweit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen erforderlich, um ein umfassendes Bild zu erhalten.

Westerloh (2019) hat in seiner Dissertation „Analyse des weltweiten Energiebedarfs zum Heizen und Kühlen von Elektrofahrzeugen“ wesentliche Zusammenhänge untersucht. Die Ergebnisse werden anschaulich und verständlich mitgeteilt. So erleichtern Anlagenschemata von HVAC inklusive Wärmepumpen deren Funktionen. Wärmebilanzen am BEV zeigen wie komplex der Themenbereich in Verbindung mit dem regionalen Klima ist: Seitens des BEV müssen u.a. der Wärmedurchgang der Karosserie, die geometrische Anordnung und Ausführung der Scheiben, die Betriebsarten der HVAC sowie der Luftmassenstrom und die Temperaturverteilung im Fahrgastraum berücksichtigt werden, seitens des regionalen Klimas sind es die Außenlufttemperatur, die relative Feuchte (r. F.) und der Tagesgang der Sonneneinstrahlung. Aufwändige Versuche wurden im Klimawindkanal nach WLTP durchgeführt und die Messungen mit Datenbanken sowie professioneller Software für entsprechende r. F. und Sonneneinstrahlungen verifiziert. Den regionalen mittleren jährlichen Verbrauch hat Westerloh numerisch ermittelt. Dabei hat er die Häufigkeit der Außenlufttemperatur mit einer Klassenweite von 10 K verschiedener Datenbanken oberhalb von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendet. In einem besonderen Abschnitt hat Westerloh den Energiebedarf zum Heizen und Kühlen von BEV für verschiedene Kontinente und Länder für einen BEV der Kompaktklasse mit und ohne Wärmepumpe (WP) zusammengestellt, ein äußerst nützliches Nachschlagewerk. Hierzu seien folgende Auszüge genannt: Für Frankfurt/Main beträgt der Verbrauch ca. $3,8\text{ kWh}/100\text{ km}$ im Jahresmittel ohne WP. In Deutschland können mit einer R-744-WP (CO_2 -WP) ca. $2\text{ kWh}/100\text{ km}$ und mit einer R1234yf-WP ca. $1,8\text{ kWh}/100\text{ km}$ im Jahresmittel gegenüber einer E-Heizung gespart werden. In Finnland beträgt die Ersparnis mit einer R-744-WP $2,4\text{ kWh}/100\text{ km}$ und mit einer R-1234yf-WP $1,8\text{ kWh}/100\text{ km}$.

Westerloh hat mit seiner Dissertation einen wesentlichen Grundstein für eine objektive Betrachtungsweise des weltweiten Energiebedarfs zum Heizen und Kühlen von BEV geliefert. Die Effizienz von Wärmepumpen kann damit transparent beurteilt werden. Auf Basis seiner Arbeit werden in Zukunft weitere Ableitungen, Vertiefungen, aber auch Vereinfachungen folgen. Meines Erachtens werden in den nächsten Jahren Regelwerke und Richtlinien zum Thema „Weltweiter Energiebedarf zum Heizen und Kühlen von BEV“ entstehen.

Neben den üblichen Verbrauchsangaben nach WLTP sollten auch die regionalen Verbräuche der HVAC in Prospekten etc. angegeben werden.

Karlshuld

Holger Großmann

Vorwort

Diese Arbeit entstand zwischen 2014 und 2017 in der Abteilung „Fahrzeugtechnik, Energieeffizienz und Klimatisierung“ der Konzernforschung der Volkswagen AG in Wolfsburg in Zusammenarbeit mit dem Institut für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Jürgen Köhler vom Institut für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig für die fachliche und inhaltliche Betreuung dieser Arbeit sowie Herrn Prof. Dr. Thomas Sattelmayer vom Lehrstuhl für Thermodynamik der Technischen Universität München für die Erstellung des Zweitgutachtens und bei Herrn Prof. Dr. Ferit Küçükcay vom Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Den Mitarbeiter/innen des Instituts für Thermodynamik der TU Braunschweig sowie der Firma TLK Thermo GmbH danke ich für die wissenschaftlichen Diskussionen. Ein ganz besonderer Dank gebührt Herrn Dr. Wilhelm Tegethoff und Herrn Dr. Nicholas Lemke für die fachliche Betreuung, die zahlreichen Diskussionen, Anregungen und Gespräche, die es mir ermöglichten, die vorliegende Arbeit fertig zu stellen sowie Herrn Hinnerk Fischer für seine Unterstützung bei Fragen zu Simulationswerkzeugen.

Ebenfalls gebührt Herrn Dipl.-Ing. Holger Großmann ein besonderer Dank, der mir eine wertvolle Hilfe bei der Strukturierung und Korrektur dieser Arbeit war.

Herzlich möchte ich meinen Vorgesetzten, Kollegen und Kolleginnen bei der Volkswagen AG danken, die mir diese Arbeit ermöglicht haben sowie für die stetige Motivation und Überwindung so mancher Hindernisse sowie meinem Doktoranden-Kollegen Sven Twenhövel für die vielen inhaltlichen Diskussionen, die gemeinsamen Veröffentlichungen und Projekte. Ich freue mich sehr, dass sich unsere Arbeiten gegenseitig ergänzt haben.

Meiner Freundin und Lebenspartnerin Karen danke ich ganz besonders herzlich für ihre jederzeitige Unterstützung. Weiterhin gilt meiner Familie, die mich bei meinem Vorhaben immer bestärkt hat, innigster Dank. Zudem bedanke ich mich bei allen hier nicht namentlich genannten Freunden, die mich bei meiner Arbeit motiviert und unterstützt haben.

Malte Westerloh

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XIX
Nomenklatur	XXI
Kurzfassung	XXV
Abstract	XXVII
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Ausgangssituation und Grundlagen	1
1.2 Ziel und Vorgehensweise der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Klimatisierungssysteme	7
2.1 Fahrgastraum	7
2.2 Klimagerät	9
2.3 Kälteanlagen	10
2.3.1 Anlagenschema einer Kälteanlage mit R-1234yf	11
2.3.2 Anlagenschema einer Kälteanlage mit R-744	12
2.4 Heizgerät mit PTC	13
2.5 Wärmepumpen	14
2.5.1 Anlagenschema einer Wärmepumpe mit R-134a	15
2.5.2 Anlagenschema einer Wärmepumpe mit R-744	19
2.6 Kältemittelverordnung	23
3 Thermisches Gesamtfahrzeugmodell	25
3.1 Aufbau des thermischen Gesamtfahrzeugmodells	26
3.2 Kopplung eines Teilsystems	28
4 Auswirkungen des Klimas auf den Energiebedarf zum Heizen und Kühlen des Fahrgastraums	31
4.1 Definition des Klimas	31
4.2 Einfluss der Außenlufttemperatur auf die Klimatisierung	31
4.2.1 Leistungsbedarf im stationären Betrieb	32
4.2.2 Energiebedarf im instationären Betrieb	32
4.3 Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Klimatisierung	33
4.4 Spezifische Enthalpie der feuchten Luft	35
4.5 Einfluss der regionalen Solarstrahlung auf den Energiebedarf	36
4.5.1 Randbedingungen der Simulation	37
4.5.2 Jahreszeitlicher und geographischer Einfluss	38
4.5.3 Einfluss der Ausrichtung (Azimutwinkels) des Pkw	39
4.5.4 Mehrbedarf an Kälteleistung durch den regionalen Einfluss der Sonnenstrahlung	40

5	Methoden zur Abbildung des regionalen Klimas	43
5.1	GREEN-MAC-LCCP©	43
5.2	FAT Studie 224	44
5.3	VDI Richtlinie 4710	45
5.4	Cluster-Analyseverfahren von Menken	45
6	Methode zur Bewertung	47
6.1	Eingangsgrößen der Bewertungsmethode	47
6.1.1	Spezifischer Energiebedarf zum Heizen und Kühlen pro km	47
6.1.2	Anzahl und Verteilung der Pkw	47
6.1.3	Durchschnittlich gefahrene Strecke je Pkw im Jahr	49
6.1.4	Gewichtete Häufigkeit der Temperaturbereiche je Stadt	50
6.2	Berechnung der Kenngrößen des Energiebedarfs	50
6.2.1	Durchschnittlicher Energiebedarf zum Heizen und Kühlen im Jahr pro Kilometer	50
6.2.2	Durchschnittlicher Energiebedarf zum Heizen und Kühlen im Jahr pro Pkw	51
6.2.3	Energiebedarf einer BEV-Flotte	51
6.2.4	Einfluss der Klimatisierung auf die Reichweite	52
6.2.5	Anteil des Heizens und Kühlens	52
6.3	Randbedingungen für die Simulation	53
6.4	Kenngrößenberechnung anhand eines Beispiels	56
7	Vergleich des Energiebedarfs von HVAC-Systemen in den Regionen	61
7.1	Weltweit	61
7.2	Nordamerika	63
7.3	Europa	65
7.4	Asien	67
7.5	USA	68
7.6	China	70
7.7	Zusammenfassung	72
8	Energiekosten für einen BEV in Deutschland	75
8.1	Stromkosten für Haushaltskunden in Deutschland	75
8.2	Stromkosten für den Betrieb eines BEV	76
8.3	Kostenvergleich eines BEV mit einem konventionellen Pkw	78
8.4	Zusammenfassung	79
9	Flottenverbrauch	81
9.1	Internationaler Flottenverbrauch	81
9.2	Flottenverbrauch von einer Millionen BEV in Deutschland bis 2020	82
9.3	Flottenverbrauch einer vollständigen Elektrifizierung	82
9.4	Zusammenfassung	85

10 Zusammenfassung und Ausblick	87
10.1 Zusammenfassung	87
10.2 Ausblick	88
Literatur	91
A Anhang - Simulationssoftware	105
A.1 Modelica/Dymola	105
A.2 TIL Suite	105
A.3 TILMedia Suite	106
A.4 TISC Suite	106
A.5 THESEUS-FE	106
B Anhang - Auswertung	109
B.1 Zentralamerika	109
B.2 Südamerika	110
B.3 Südwestpazifik	112
B.4 Afrika	113
C Anhang - Berechnung des Sonnenstands	115
C.1 Wärmestrahlung	115
C.2 Solarstrahlung und Tagesgang der Sonne	116
C.3 Schwächung der Solarstrahlung	119
D Anhang - Vergleich der Klimadaten aus GREEN-MAC und METEONORM 121	
D.1 Beijing	121
D.2 Boston	122
D.3 Moskau	122
D.4 Ottawa	123
D.5 Shanghai	123
D.6 Tokyo	124
D.7 Washington, D. C.	124
E Anhang - Zustandsänderung der R-744 Wärmepumpenkreisläufe im p,h und T,h-Diagramme	125
E.1 Temperaturbereich 2: 5 °C	125
E.2 Temperaturbereich 3: 15 °C	125
E.3 Temperaturbereich 4: 25 °C	126
E.4 Temperaturbereich 5: 35 °C	126

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Anzahl der weltweit zugelassenen batterieelektrischen Pkw (BEV) und Plug-in-Hybride (PHEV).	2
Abb. 2.1	Energiebilanz am Fahrgastraum.	8
Abb. 2.2	Spektrale Transmission in Abhängigkeit der Wellenlänge einer Infrarot reflektierenden Scheibe und einer Scheibe aus Grönglas.	9
Abb. 2.3	Aufbau des Klimageräts nach Weustenfeld.	9
Abb. 2.4	Darstellung eines Kältemittelkreislaufs.	11
Abb. 2.5	Zustandsänderung des R-744-Kälteanlage beim Kühlen.	12
Abb. 2.6	Anlagenschema einer R-134a Wärmepumpe.	16
Abb. 2.7	Anlagenschema einer R-134a Wärmepump beim Heizben.	17
Abb. 2.8	Zustandsänderung des R-134a Wärmepumpe beim Heizen.	18
Abb. 2.9	Anlagenschema einer R-134a Wärmepumpe beim Kühlen.	19
Abb. 2.10	Anlagenschema einer R-744-Wärmepumpe.	19
Abb. 2.11	Zustandsänderung des R-744 Wärmepumpe beim Heizen.	21
Abb. 2.12	Anlagenschema einer R-744-Wärmepumpe beim Heizben.	22
Abb. 2.13	Anlagenschema einer R-744-Wärmepumpe beim Kühlen.	22
Abb. 3.1	Methode der gekoppelten Simulation mit einer Co-Simulationssoftware.	25
Abb. 3.2	Auszug aus der Kopplung einiger Modellkomponente mit einer zentralen Co-Simulationsplattform.	27
Abb. 3.3	Signalausgleich einzelner Modellkomponenten.	28
Abb. 4.1	Leistungsbedarf zum Heizen und Kühlen des Fahrgastraums.	32
Abb. 4.2	Energiebedarf zum Aufheizen und Abkühlen des Fahrgastraums.	33
Abb. 4.3	Leistungsbedarf zum Kühlen des Fahrgastraums.	34
Abb. 4.4	Spezifische Enthalpiedifferenz für drei unterschiedliche Orte.	36
Abb. 4.5	Maximale Temperaturdifferenz im Fahrgastraum beim Aufheizen in der Sonne.	39
Abb. 4.6	Maximale Temperaturdifferenz im Fahrgastraum beim Aufheizen in der Sonne für unterschiedliche Ausrichtung des Pkw.	39
Abb. 4.7	Mehrbedarf an Kälteleistung im Außenluftbetrieb.	40
Abb. 5.1	Beispiel der gewichteten Häufigkeit der sechs Temperaturbereichen für ausgewählter Städte.	44
Abb. 5.2	Zusammengefasste repräsentative Klimaverläufe für die Region USA sowie zusammengefasste Tagesfahrzyklen.	46
Abb. 6.1	Geschwindigkeitsprofil des Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP).	53

Abb. 6.2	Elevation der Solarstrahlung und Azimutwinkel (Ausrichtung) des Pkw während des Fahrzyklus WLTP für den 30sten Breitengrad.	55
Abb. 6.3	Transienter Verlauf der gefahrenen Strecke im WLTP.	58
Abb. 6.4	Gewichtete Häufigkeit nach METEONORM und GREEN-MAC-LCCP für Frankfurt am Main (FaM).	59
Abb. 7.1	Weltweiter Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme. . .	62
Abb. 7.2	Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme in Nordamerika.	64
Abb. 7.3	Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme in Europa. . .	65
Abb. 7.4	Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme für ausgewählte Regionen in Asien.	67
Abb. 7.5	Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme in USA. . . .	69
Abb. 7.6	Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme in Regionen von China.	71
Abb. 7.7	Regionale Unterteilung für einen energieeffizienten Einsatz verschiedener HVAC-Systeme.	72
Abb. 8.1	Zusammensetzung des Stromverbrauchs eines Vier-Personen-Haushalts in Deutschland.	76
Abb. 8.2	Zusammensetzung des Stromverbrauchs eines Vier-Personen-Haushalts zuzüglich eines BEV mit einer Kälteanlage und PTC zum Heizen und Kühlen des Fahrgastraums.	77
Abb. 8.3	Zusammensetzung des Stromverbrauchs eines Vier-Personen-Haushalts zuzüglich eines BEV mit einer Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen des Fahrgastraums.	78
Abb. 9.1	Weltweiter Energiebedarf zum Heizen und Kühlen bei einer vollständigen Elektrifizierung des Pkw-Bestandes für die untersuchten HVAC-Systeme in TWh/(a).	83
Abb. 9.2	Strommix für Europa, USA, China sowie Weltweit.	84
Abb. A.1	Generatormodells des Fahrgastraums einer Kompaktklasse.	107
Abb. B.1	Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme für Regionen in Zentralamerika.	109
Abb. B.2	Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme für Südamerika.	110
Abb. B.3	Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme für Regionen in Südwestpazifik.	112
Abb. B.4	Energiebedarf in Wh/km verschiedener HVAC-Systeme für Afrika. . .	113
Abb. C.1	Azimut- und Elevationswinkel.	117
Abb. C.2	Richtung der Solarstrahlung bei unterschiedlichen Breitengraden. . . .	120
Abb. D.1	Gewichtete Häufigkeit nach METEONORM und GREEN-MAC-LCCP für Beijing.	121
Abb. D.2	Gewichtete Häufigkeit nach METEONORM und GREEN-MAC-LCCP für Boston.	122