



Leonhard Moser, BSc

Ökologische und energetische Aspekte der Elektromobilität

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Udo Bachhiesl

Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

21.06.2018

Datum

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized cursive letters, positioned above a horizontal line.

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich gerne beim Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation der Technischen Universität Graz und seinem Leiter Herrn Prof. Mag. DI Dr. Heinrich Stigler für die Möglichkeit bedanken, meine Masterarbeit am IEE schreiben zu dürfen. Mein besonderer Dank gilt dabei meinem Betreuer Assoc.Prof. DI Dr. Udo Bachhiesl, der mich richtungsweisend und mit viel Engagement während meiner Arbeit begleitet hat.

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

Der größte Dank gilt meinen Eltern. Vielen Dank für die finanzielle Unterstützung sowie euren motivierenden Beistand während meines gesamten Studiums.

Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es einen Überblick über die Umweltauswirkungen der Elektromobilität in den verschiedenen Fahrzeuglebensphasen im Vergleich mit herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor darzustellen sowie den zukünftigen europäischen Mehrverbrauch an elektrischer Energie auf regionaler Ebene abzuschätzen. Dazu wurden zuerst die Grundlagen der Elektromobilität betrachtet und im Speziellen auf die Charakteristiken der Lithium-Ionen-Batterie eingegangen. Im Weiteren wurden verschiedene Analysemethoden zur Bestimmung des Energiebedarfs und den damit einhergehenden Treibhausgasemissionen anhand bestehender Studien miteinander verglichen. Für die Ermittlung des zusätzlichen Strombedarfs durch die Elektromobilität wurde anhand von europäischen Fahrzeugdaten der zukünftige Bedarf an elektrischer Energie für ein Szenario der internationalen Energieagentur berechnet. Es zeigt sich, dass aufgrund der variablen Stromproduktionsquellen sowie Unsicherheiten hinsichtlich der Umweltauswirkungen der Batterieproduktion keine generelle Aussage darüber getroffen werden kann, ob Elektrofahrzeuge beim derzeitigen Stand der Technik umweltfreundlicher als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind. Hierbei spielt vor allem der künftige Anteil an erneuerbarer Energie am europäischen Strommix eine bedeutende Rolle. Die Ergebnisse der Regionalisierung des zusätzlichen europäischen Strombedarfs stellen dar, dass im Falle des betrachteten Szenarios bzw. bei einer Anzahl von 38 Mio. Elektrofahrzeugen mit einem Mehrbedarf von etwa 2,4 % zu rechnen ist.

Abstract

The aim of the present master thesis is to present an overview of the environmental impact of electromobility in the different vehicle life phases in comparison with conventional combustion engine vehicles and to estimate the future European additional consumption of electrical energy at the regional level. To this end, the basics of electromobility were first considered and in particular the characteristics of the lithium-ion battery. Furthermore, various analysis methods for determining the energy demand and the associated greenhouse gas emissions were compared on the basis of existing studies. In order to determine the additional electricity demand from electromobility, the future demand for electrical energy for a scenario of the international energy agency was calculated on the basis of European vehicle data. It can be seen that due to the variable sources of electricity production and uncertainties surrounding the environmental impact of battery production, no general statement can be made as to whether electric vehicles are more environmentally friendly than internal combustion engine vehicles in the current state of the art. Above all, the future share of renewable energy in the European electricity mix plays an important role here. The results of the regionalization of the additional European electricity demand show that in the case of the considered scenario or with a number of 38 million electric vehicles, an additional demand of about 2.4% is to be expected.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Ziel der Arbeit und Herangehensweise	9
1.2	Ausgangslage.....	10
1.2.1	Aktueller Stand der Elektromobilität	12
1.2.2	Entwicklung des globalen EV Bestands	14
1.2.3	Preisentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien	14
2	Grundlagen	16
2.1	Vor- und Nachteile des Elektroantriebes	16
2.2	Elektrofahrzeugtypen.....	17
2.2.1	Hybride	17
2.2.2	Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)	18
2.2.3	Brennstoffzellenfahrzeuge	18
2.3	Traktionsbatterie.....	18
2.3.1	Definitionen.....	18
2.3.2	Anforderungen an Traktionsbatterien	19
2.3.3	Übersicht über Batterietechnologien	21
2.3.3.1	Blei-Säure-Batterie (PbA)	22
2.3.3.2	Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH).....	22
2.3.3.3	Natrium-Nickelchlorid-Batterie (ZEBRA)	22
2.3.4	Lithium-Ionen-Batterie (LIB)	22
2.3.4.1	Allgemeine Funktionsweise	22
2.3.4.2	Kathodenmaterialien für LIB	23
2.3.4.3	Anodenmaterialien für LIB	26
2.3.4.4	Bauformen von LIB	27
2.3.4.5	Lebensdauer – Alterungseffekte	28
2.3.4.6	Ladevorgang	33
2.3.5	Aufbau einer Batterie.....	35
2.3.6	Verwendete Batterietechnologien für BEV	35
2.3.7	Zukünftige Batterietypen.....	36
2.3.8	Batteriemanagementsystem	39
2.3.9	Thermomanagement	41
2.4	Ladeinfrastruktur.....	42
2.5	Potenzielle Materialengpässe und geostrategische Lage	47
3	Energieverbrauch und THG-Emissionen von BEV	51

3.1	Einführung	51
3.2	Allgemeiner Leistungsbedarf von Fahrzeugen	53
3.3	TTW – Tank to Wheel.....	54
3.4	WTT – Well to Tank.....	56
3.4.1	Bereitstellung elektrischer Energie	58
3.4.2	Bereitstellung fossiler Kraftstoffe	61
3.4.3	Vergleich.....	65
3.5	WTW – Well to Wheel	66
3.6	Batterieproduktion	68
3.6.1	Umweltbeeinträchtigung durch die Produktion der Traktionsbatterie	69
3.6.2	Aufteilung des Energiebedarfs und der THG-Emissionen auf die einzelnen Produktionsschritte.....	74
3.6.3	Recycling	76
3.6.4	Second Life.....	79
3.6.5	Zusammenfassung der Umweltauswirkungen durch die Traktionsbatterie ..	81
3.7	WTW mit Berücksichtigung der Batterieproduktion	82
3.8	Lebenszyklusanalyse	83
3.9	Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse	89
4	Regionalisierung des zusätzlichen Energiebedarfs durch die Elektromobilität	90
4.1	Vorgehensweise bei der Ermittlung.....	90
4.2	Ergebnisse.....	92
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	102
6	Verzeichnisse	104
6.1	Literaturverzeichnis	104
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	108
6.3	Tabellenverzeichnis.....	111
7	Anhang.....	113

Abkürzungsverzeichnis

2DS	„2 Degree Szenario“ der IEA
B2DS	„Beyond 2 Degree Szenario“ der IEA
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Batterie Management System
CC	Constant-Current
CV	Constant-Voltage
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage
CO ₂ eq	CO ₂ – Äquivalent
DOD	Depth of Discharge
EV	Electric Vehicle
EVI	Electric Vehicle Initiative
GWP	Global Warming Potential
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
IEA	Internationale Energie Agentur
JEC	Joint Research Centre
LCA	Life Cycle Analysis
LCE	Lithium Carbonate Equivalent
LCI	Life Cycle Inventory
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
MCC	Multi-Stage Constant-Current
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PHEV	Plug In Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
RTS	Referenzszenario der IEA
SOC	State of Charge
SOF	State of Function
SOH	State of Health
THG	Treibhausgas
TTW	Tank to Wheel
WLTC	Worldwide harmonized Light duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WTT	Well To Tank
WTW	Well To Wheel

1 Einleitung

In diesem einleitenden Kapitel werden die Ziele und die Herangehensweise an die Arbeit dargestellt sowie auf die Ausgangslage bzw. Entwicklung der weltweiten Elektromobilität eingegangen.

1.1 Ziel der Arbeit und Herangehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Energieverbrauch und die damit einhergehenden Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) beim Betrieb sowie bei der Herstellung und dem Recycling von Elektrofahrzeugen (EV) bzw. im Besonderen von rein batteriebetriebenen Personenkraftwagen (BEV) zu betrachten. Diese sollen dabei mit Personenkraftwagen (PKW) mit Verbrennungsmotor (ICEV) verglichen werden um eine Aussage darüber treffen zu können, ob Elektrofahrzeuge tatsächlich klimafreundlicher als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind bzw. beim Betrieb und insbesondere über die gesamte Lebensdauer weniger THG emittieren. Zusätzlich soll untersucht werden wie sich der Stromverbrauch auf regionaler Ebene durch eine entsprechende Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen ändert bzw. wie groß dabei der Anteil am Gesamtstrombedarf ist.

Dafür wird zuerst in Kapitel 1 auf die derzeitige Ausgangslage der weltweiten Elektromobilität eingegangen sowie mögliche Szenarien für die Entwicklung der Elektromobilität hinsichtlich der Einhaltung von gesteckten Klimazielen beschrieben. In Kapitel 2 werden die Grundlagen der Elektromobilität erläutert. Dabei wird vor allem auf Batterietypen, deren Eigenschaften und mögliche Hemmnisse im Zuge der Produktion eingegangen. Einen Hauptpunkt der Arbeit bildet Kapitel 3, in welchem verschiedene Methoden zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen von Elektrofahrzeugen sowie die entsprechenden Vergleiche mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor eingehend betrachtet werden. Dazu wurden die Ergebnisse aktueller Studien untersucht und zusammengefasst. Ein wesentlicher Punkt ist dabei die Untersuchung des Umwelteinflusses der Batterieproduktion sowie des Batterierecyclings. Kapitel 4 widmet sich der Untersuchung des durch die Elektromobilität benötigten Strombedarfs bezogen auf die europäischen NUTS-2-Ebenen. Dazu wurde mit Daten von Eurostat bezüglich der gefahrenen Fahrzeugkilometer und der angemeldeten Fahrzeuge sowie dem Energiebedarf eines Referenz-Elektrofahrzeugs der Strombedarf für ein in Kapitel 1 erläutertes Szenario abgeschätzt. Im Anhang der Arbeit finden sich alle relevanten Daten, welche für die in dieser Arbeit ermittelten Zahlen benötigt wurden.

1.2 Ausgangslage

Global sind leichte Nutzfahrzeuge für etwa 10 % des Energieverbrauchs und der anthropogenen THG-Emissionen verantwortlich. Die Anzahl dieser Fahrzeuge wird sich bis 2050 von aktuell rund 1,1 Mrd. auf rund 2 Mrd. erhöhen. Diese Prognose führt zu einem dramatischen Anstieg der Nachfrage nach Benzin und Diesel, was Bedenken hinsichtlich der Energiesicherheit sowie Auswirkungen auf den Klimawandel und die Luftqualität in Städten aufwirft [1, p. 3, 2].

In Anbetracht der teils sehr schlechten städtischen Luftqualität haben in letzter Zeit immer mehr europäische Städte Fahrverbote für Dieselfahrzeuge mit zu hohen Emissionswerten ausgesprochen oder planen diese einzuführen. Erst im Februar 2018 hat das Bundesverwaltungsgericht in Leipzig entschieden, dass solche Fahrverbote für Dieselfahrzeuge rechtlich zulässig sind, überall dort wo die Stickoxidgrenzwerte überschritten werden. Zunächst sollen davon nur ältere Dieselmotoren mit hohen Stickstoffemissionswerten bis zur Schadstoffklasse 4 betroffen sein, wobei Fahrverbote bereits ab September 2019 auf Fahrzeuge der Euro-5-Klasse ausgeweitet werden können. Als erste Stadt in Deutschland plant Hamburg noch in der ersten Jahreshälfte von 2018 zwei Hauptverkehrsstraßen für ältere Dieselfahrzeuge zu sperren [3]. In anderen Ländern bzw. Städten Europas gibt es bereits solche Einschränkungen. So gilt beispielsweise in Barcelona seit 1. Dezember 2017 an den Tagen, an denen die Grenzwerte für Stickoxide deutlich überschritten werden, ein Fahrverbot für Diesel-PKW mit Erstzulassung vor 2006 und Benzinern mit Erstzulassung vor 2000. Ab 2020 sollen diese Fahrzeuge gänzlich aus dem zentralen Stadtbereich verbannt werden. Auch in Oslo, wo bereits jetzt rund 40 % aller neugekauften Autos Elektroautos sind, wird an Tagen hoher Luftverschmutzung ein vorübergehendes Fahrverbot ausgesprochen. Ziel ist es dabei, bis 2024 die gesamte Innenstadt frei von Fahrzeugen auf Basis fossiler Kraftstoffe zu bekommen. Ein weiteres Beispiel für Städte mit existierenden Fahrverboten für Autos mit Verbrennungsmotor ist Paris. In der französischen Hauptstadt dürfen bereits jetzt Diesel-PKW mit Erstzulassung vor 2001 und Benzin-PKW mit Erstzulassung vor 1997 tagsüber nicht mehr gefahren werden. Ziel der Stadt ist es, bis 2024 frei von Dieselfahrzeugen sowie bis 2030 frei von allen Autos mit Verbrennungsmotor zu sein [4].

In der Hoffnung, den Klimawandel abzumildern, wurden sowohl nationale als auch internationale Ziele zur Verringerung der anthropogenen Treibhausgasemissionen festgelegt. Im November 2015 trat das Pariser Klimaschutzabkommen als Nachfolger des Kyoto-Protokolls in Kraft. Darin wird das Ziel festgelegt, die Erderwärmung auf unter 2 °C bzw. wenn möglich auf 1,5 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu beschränken [5, p. 8].

Die internationale Energieagentur (IEA) definiert dazu drei Szenarien, welche die Auswirkungen unterschiedlicher politischer und technologischer Entscheidungen darstellen sollen.

Das Referenzszenario (RTS) stellt die Entwicklung des Weltklimas unter Berücksichtigung der Verpflichtungen der Länder die Emissionen zu beschränken und die Energieeffizienz zu steigern, sowie die im Rahmen des Pariser Klimaschutzabkommens zugesicherten Beiträge

einzuhalten, dar. Die IEA weist darauf hin, dass dieser Ansatz bereits einem bedeutenden Wandel gleichkommt und neben erheblichen Emissionssenkungen vor allem auch technische und politische Änderungen erfordert. Trotz dieser Bemühungen würde dies einen durchschnittlichen Temperaturanstieg von 2,7 °C bis 2100 zur Folge haben. Es wird weiter davon ausgegangen, dass sich das Weltklima zu diesem Zeitpunkt noch nicht stabilisiert hätte und es auch darüber hinaus zu einem Temperaturanstieg kommen würde [6, p. 23].

Das 2 °C Szenario (2DS) beschreibt einen Pfad für das Energiesystem und eine CO₂-Emissionskurve, mit welcher mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 50 % die globale Erderwärmung auf 2 °C bis 2100 limitiert wird. In diesem werden die jährlichen CO₂-Emissionen aus dem Energiesektor bis 2060 um 70 % reduziert. Das Szenario definiert die kumulativen Emissionen von 2015 bis 2100 mit 1.170 Gigatonnen CO₂ (siehe Abbildung 1). Um in diesem Bereich zu bleiben, ist es nötig, die Emissionen durch die Verbrennung von Brennstoffen und industriellen Prozessen, auch nach 2060 noch weiter zu senken und bis 2100 eine CO₂-Neutralität im Energiesystem zu erreichen. Das 2DS wird als aktuell zentrales Klimaminderungsszenario angesehen und erfordert eine substantiell verstärkte Reaktion im Vergleich zu den heutigen Bemühungen [6, p. 23].

Das „unter 2 °C Szenario“ (B2DS) versucht darzustellen, wie weit uns heute bereits verfügbare oder in der Entwicklung befindliche Technologien unter das 2 °C Ziel bringen könnten. Dazu werden Technologieverbesserungen und deren Einsatz an die maximalen Grenzen getrieben, um bis 2060 netto Null Emissionen zu erreichen, ohne dabei Technologiedurchbrüche zu erwarten oder das Wirtschaftswachstum zu begrenzen. Dieser Ansatz führt dazu, dass die Emissionen aus dem Energiesektor von 2015 bis 2100 auf einen kumulierten Betrag von 750 Gigatonnen CO₂ beschränkt sind. Im Vergleich zum ersten Szenario entspricht dies einer 50-prozentigen Wahrscheinlichkeit, den globalen Temperaturanstieg auf 1,75 °C zu beschränken. Hierzu ist es nötig, bereits 2060 eine Netto Null-Emission zu erreichen, wobei angemerkt werden soll, dass diese durch negative Emissionen durch den Einsatz von Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) unterstützt wird [6, p. 23].

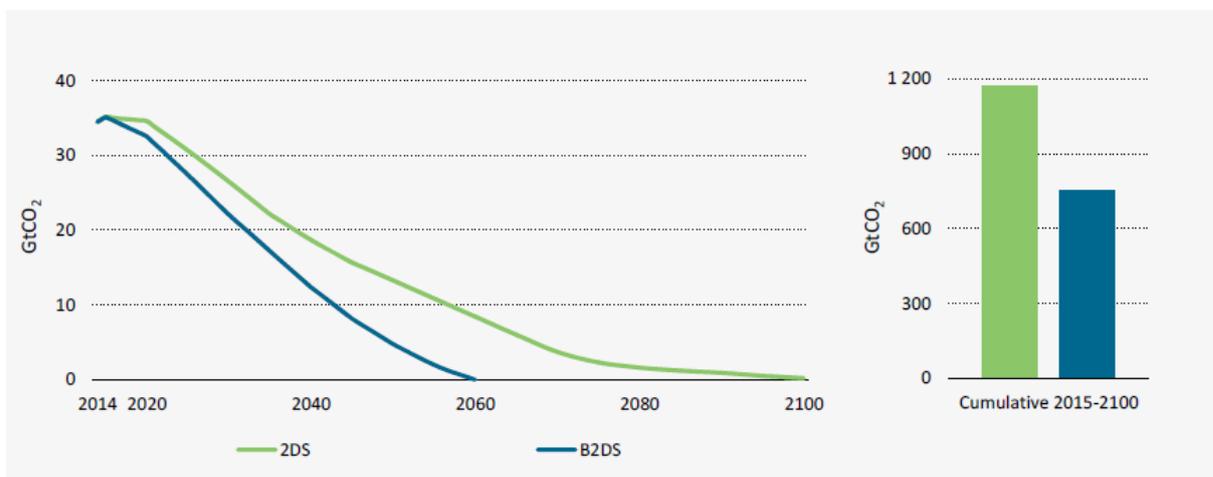


Abbildung 1: Kumulative CO₂-Emissionsguthaben für die Szenarien 2DS und B2DS [6, p. 25].

Der Verkehrssektor, welcher für 23 % der globalen energieverbundenen THG-Emissionen verantwortlich ist, muss hier eine massive Reduktion erfahren, um die Emissionsziele der Länder zu gewährleisten. Allgemein spielt die Elektrifizierung des Transportsektors eine große Rolle in allen IEA Szenarien, wobei hier darauf hingewiesen wird, dass eine solche Elektrifizierung mit einer Dekarbonisierung des Elektrizitätssektors verbunden ist [5, p. 8].

1.2.1 Aktueller Stand der Elektromobilität

Obwohl der Markt für Elektrofahrzeuge immer größer wird und auch die Anzahl der Elektrofahrzeuge immer weiter steigt, beträgt der Anteil am gesamten PKW-Bestand derzeit nur etwa 0,2 % [5, p. 22].

Bereits 2009 wurde die Electric Vehicle Initiative (EVI), ein multi-staatliches Politikforum mit dem Ziel der Beschleunigung des weltweiten Einsatzes von Elektrofahrzeugen gegründet. Die zehn Mitgliedsstaaten (Kanada, China, Frankreich, Deutschland, Japan, Niederlande, Norwegen, Schweden, Großbritannien und die USA) verfügen kollektiv über beinahe den gesamten weltweiten EV-Bestand. Etwa 95 % der weltweit registrierten EVs werden diesen Ländern zugeschrieben. 2017 startete die EVI die EV30@30 Kampagne mit dem Ziel, bis 2030 30 % aller Kraftfahrzeuge der Mitgliedsstaaten zu elektrifizieren (inklusive Hybrid und Brennstoffzelle) [5, pp. 9-11].

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Elektromobilität mit Zahlen des Global EV Outlook 2017 dargestellt [5]. Dieser enthält neben Daten der EVI-Mitgliedsstaaten auch jene von Island, Korea, Lichtenstein, der Schweiz, der Türkei sowie von allen Mitgliedsstaaten der europäischen Union (EU 28).

Weltweit wurden 2016 über 750.000 Elektroautos verkauft. Trotz einer Steigerung um 40 % im Vergleich zu 2015 war dies das erste Jahr seit 2010, dass eine Steigerungsrate von unter 50 % aufweist. Diese Wachstumsrate würde jedoch noch ausreichen, um die oben genannten IEA Szenarien zu erfüllen. China war im Jahr 2016 mit 336.000 neu registrierten Fahrzeugen gefolgt von den USA mit 160.000 Fahrzeugen der mit Abstand größte Markt für Elektroautos. In den europäischen Ländern wurden gesamt 215.000 Elektrofahrzeuge neu zugelassen. Der Marktanteil dieser verkauften Elektrofahrzeuge ist jedoch in den meisten Ländern sehr gering. 2016 wurde nur in sechs Ländern ein Anteil an Elektrofahrzeugen bei den Neuverkäufen von über 1 % erreicht, wobei Norwegen hierbei mit 29 % mit Abstand führend ist. Dahinter folgen die Niederlande mit 6,4 %, Schweden mit 3,4 % bzw. China, Frankreich und Großbritannien mit je etwa 1,5 %. Zu beachten ist bei diesen Zahlen auch die Verteilung zwischen rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen und Plug-in-Hybrid Fahrzeugen (PHEV). Während in China und Frankreich etwa drei Viertel der Verkäufe Elektrofahrzeuge BEV sind, ist die Lage in anderen betrachteten Ländern gegensätzlich. So sind in Großbritannien 28 %, den Niederlanden 15 % sowie in Schweden 22 % der neu zugelassenen EVs von 2016 BEVs (siehe Abbildung 2) [5, pp. 12-13].

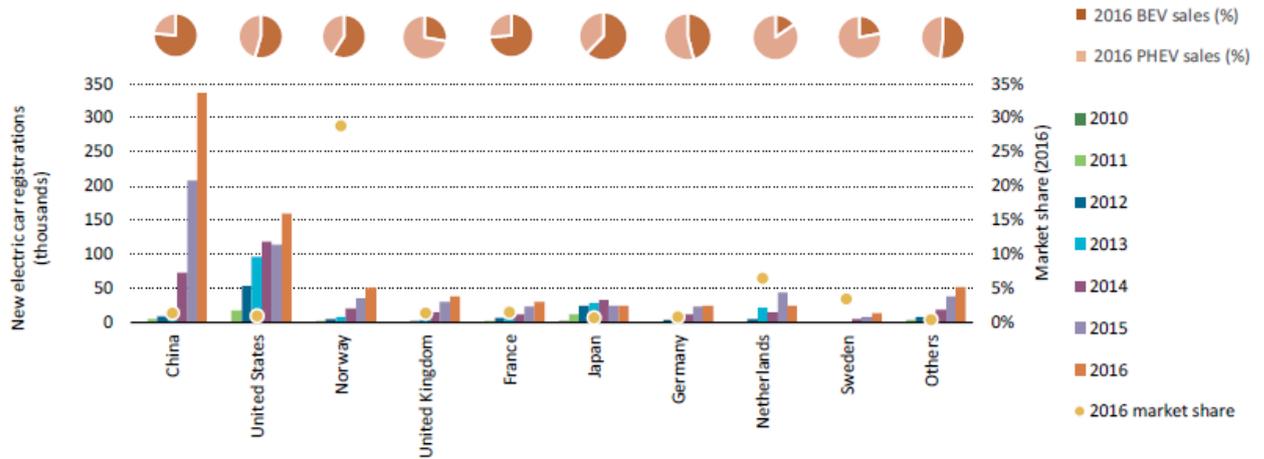


Abbildung 2: Verkaufszahlen und Marktanteil von BEVs und PHEVs in ausgewählten Ländern zwischen 2010 und 2016 [5, p. 12].

Der globale Bestand von Elektrofahrzeugen, wie in Abbildung 3 dargestellt, hat im Jahr 2016 die zwei Millionen Marke überschritten. Die jährlichen Wachstumsraten des Bestands sind jedoch, wie die Verkaufswachstumsraten, rückläufig. Betrug die Bestandwachstumsrate im Jahr 2014 noch 84 %, so verringerte sich dies bis zum Jahr 2016 auf 59 %. Vergleicht man den Bestand von BEV und PHEV, so lässt sich erkennen, dass etwa 60 % des weltweiten EV-Bestands BEVs sind. Auch die jährlichen Bestandwachstumsraten sind bei BEVs mit 62 % im Vergleich zu PHEVs mit 59 % etwas höher. Dies lässt sich vor allem durch den in China stark wachsenden Markt für BEVs erklären. Würden die chinesischen Zahlen nicht berücksichtigt, so wären seit 2009 die Wachstumsraten von PHEVs höher als jene von BEVs (Ausnahme 2014) [5, pp. 21-22].

Im Global EV Outlook 2017 wird weiters angemerkt, dass in den unterschiedlichen Ländern neben den Verkaufszahlen von 2016 auch unterschiedliche Charakteristiken hinsichtlich der Gesamtanzahl von BEV bzw. PHEV bestehen. Während ein Großteil der elektrifizierten Fahrzeuge in China, Frankreich und Norwegen rein batteriebetrieben ist, stellt sich die Situation in den Niederlanden mit 88 % PHEV gegensätzlich dar [5, pp. 21-22].

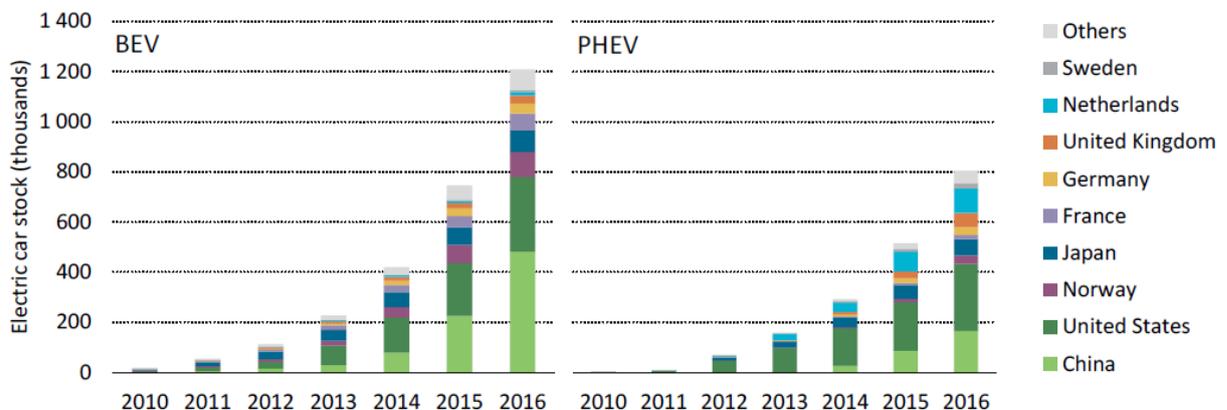


Abbildung 3: Entwicklung des globalen EV-Bestands von 2010 bis 2016 [5, p. 22].

1.2.2 Entwicklung des globalen EV Bestands

Die IEA sieht vor allem den Zeitraum bis 2020 bzw. von 2020 bis 2030 als essentiell an, um eine signifikante Steigerung der Elektromobilität zu erreichen und in weiterer Folge den IEA-Szenarien hinsichtlich einer sauberen und dekarbonisierten Mobilität zu entsprechen. Bereits im Referenzszenario der IEA wird eine Anzahl von 56 Millionen EVs für das Jahr 2030 projiziert. Für das 2DS steigert sich diese Zielsetzung bereits auf 160 Mio. Fahrzeuge. Um im Rahmen des B2DS zu bleiben, bei dem bereits kurz nach 2060 eine Netto-Null bei den THG-Emissionen des Energiesektors geplant ist, wird mit einer weltweiten EV-Flotte von 25 Mio. Fahrzeugen bis 2020 bzw. über 200 Mio. bis 2030 gerechnet. Die unterschiedlichen Entwicklungsszenarien werden in Abbildung 4 dargestellt. Sowohl im 2DS als auch im B2DS tragen BEVs sowie PHEVs zur Gesamtreduktion der THG-Emissionen bei. Dies liegt auch an der gleichzeitig fortschreitenden Dekarbonisierung des Elektrizitätssektors sowie der Annahme eines hohen Anteils an elektrisch gefahrenen Kilometern bei PHEV [5, pp. 24-25].

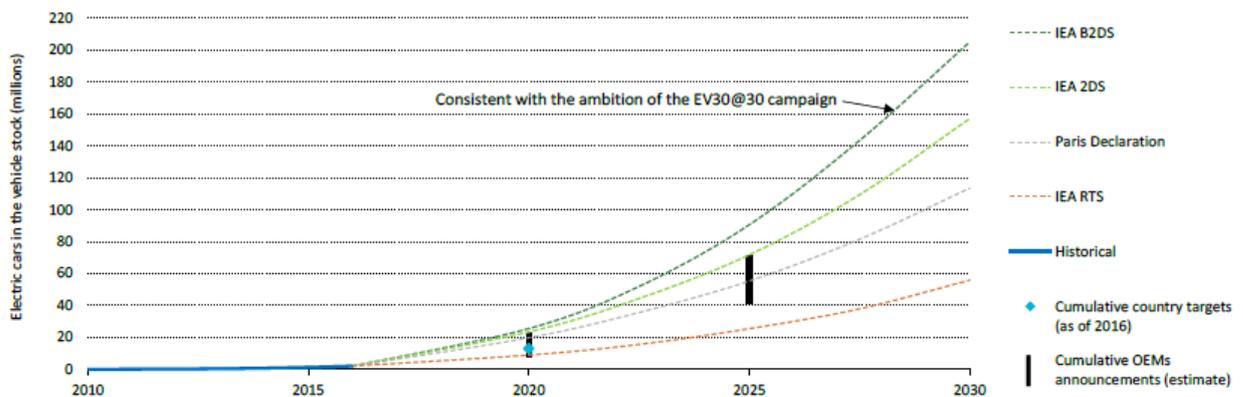


Abbildung 4: Entwicklungsszenarien für EV-Fahrzeugbestand bis 2030 [5, p. 25].

Für die IEA ist es unbestritten, dass die aktuelle Marktaufnahme von EVs stark von der politischen Umgebung beeinflusst wird. Mittelfristig wird davon ausgegangen, dass politische Unterstützung nötig ist, um Hindernisse für die Einführung von EVs abzubauen. Jedoch darf dabei nicht unbeachtet bleiben, dass diese Maßnahmen keine dauerhaften Lösungen sein können. So sind zum Beispiel Subventionen für EVs bei steigenden Verkaufszahlen zu einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr wirtschaftlich tragbar. Auch werden durch entsprechend hohe EV-Zahlen bzw. damit einhergehend, einem geringeren Anteil an ICEVs, Einnahmen durch konventionelle Kraftstoffsteuern zurückgehen, was eine Neuorientierung der Art und Weise, wie Einnahmen für die Entwicklung der Straßeninfrastruktur generiert werden, nötig macht [5, p. 7].

1.2.3 Preisentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien

Ein wichtiger Faktor für die zukünftige Entwicklung der Elektromobilität ist unter anderem der Preis gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Vor allem die Kosten für die Traktionsbatterie eines Elektrofahrzeugs führen dazu, dass diese im Moment noch erheblich teurer sind als vergleichbare herkömmliche Fahrzeuge. In den letzten Jahren sind die Preise

für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) allerdings deutlich gesunken. Wie hoch die derzeitigen und zukünftigen Preise für lithiumbasierte Traktionsbatterien sind, kann je nach betrachteter Quelle teils stark variieren. Während ein Teil dieser Variation auf Unterschiede in den spezifischen Materialien oder Konfigurationen zurückzuführen ist, kann sie auch Unterschiede in der Definition und dem Kontext der Begriffe "Kosten" und "Preis" widerspiegeln. So kann es hier beispielsweise zu Vermischungen darüber kommen, ob der Preis, den der Käufer für die Batterie zahlt, oder die Kosten, welche die Herstellung verursacht, betrachtet werden. Ein weiterer Punkt, der zu Verwirrung führen kann, ergibt sich aus der Art der Technologie. Traktionsbatterien bestehen aus mehreren Teilkomponenten, von denen die Batteriezellen den Großteil darstellen. Nicht-technische Medien verwenden diese Begriffe üblicherweise synonym, was zu Verwirrung führt, wenn ein Preis oder Kosten angegeben werden. Schließlich variieren die Kosten für Zellen und die zusätzlichen Batteriepack-Komponenten je nach ihrer beabsichtigten Anwendung (z. B. Plug-in-Hybrid oder Vollelektrofahrzeug) aufgrund von Unterschieden in Design und Leistung. Auch dass die Technologie relativ neu ist und die Form, Größe, Chemie und Verpackung für unterschiedliche Fahrzeuge variiert, muss hier berücksichtigt werden [7, pp. 1-3].

Eine Studie der Unternehmens- und Strategieberatung McKinsey & Company von 2017 hat ergeben, dass die Preise für ein Batteriepack von 2010 bis 2016 um etwa 80 % abgenommen haben (von 1.000 \$/kWh auf 227 \$/kWh) [8, p. 10]. Auf eine ähnliche Zahl kommt eine im Jahr 2017 von Bloomberg New Energy Finance (BNEF) durchgeführte Studie. Anhand der Befragung von mehr als 50 Unternehmen wurden dabei aktuelle Preise für Batteriepacks von 209 \$/kWh ermittelt. BNEF gibt weiter an, dass alleine von 2016 auf 2017 eine Preisreduktion von 24 % stattgefunden hat (siehe Abbildung 5) [9]. Auch Autohersteller GM und LG Chem sowie Tesla und Panasonic haben Batteriepackkosten zwischen 180 \$/kWh und 200 \$/kWh verkündet. Vor allem durch eine Erhöhung des Produktionsvolumens ist es möglich die Batteriekosten weiter zu reduzieren. Nach Angaben des US-Energieministeriums ermöglicht eine Erhöhung des Produktionsvolumens von 25.000 Einheiten auf 100.000 Einheiten für ein Batteriepack eine Senkung der Produktionskosten um 13 % pro kWh. Andere Studien bestätigen, dass das Produktionsvolumen eine Schlüsselrolle bei der Kostenreduzierung von Batteriepacks spielt [5, p. 14].

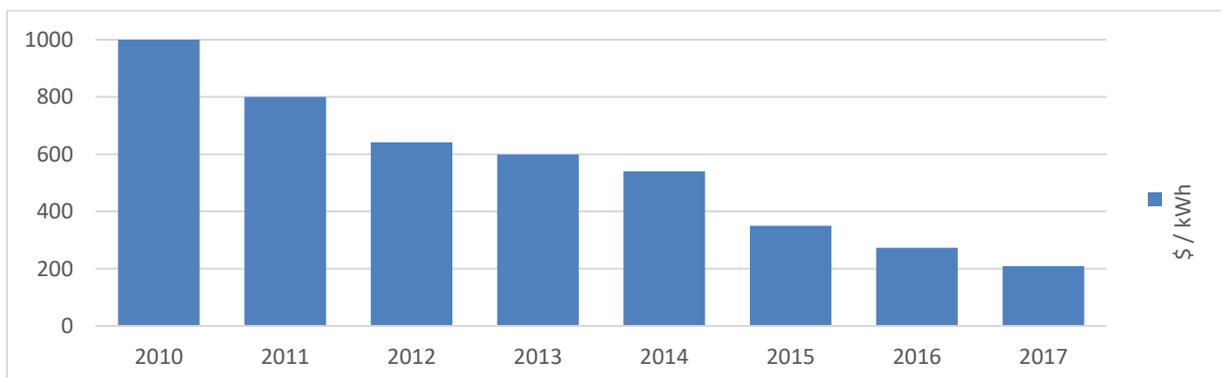


Abbildung 5: Preisentwicklung von LIB-Batteriepacks zwischen 2010 und 2017 [9]. – eigene Darstellung

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Vor- und Nachteile des Elektroantriebs sowie die verschiedenen Elektrofahrzeugtypen dargestellt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der verwendeten Traktionsbatterie sowie den Charakteristiken derzeitiger und zukünftiger lithiumbasierter Batteriezellen. Des Weiteren werden potenzielle Materialengpässe hinsichtlich der Batterieproduktion thematisiert.

2.1 Vor- und Nachteile des Elektroantriebes

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile, die ein Auto mit Elektroantrieb im Vergleich zu einem Auto mit Verbrennungsmotor hat, erläutert.

Vorteile

Vor allem die im Vergleich zum Verbrennungsmotor (max. 40 %) sehr hohe Energieeffizienz von mehr als 90 % im nahezu gesamten Arbeitsbereich eines Elektromotors ist hier hervorzuheben. Zusätzlich besteht bei einem EV anders als bei herkömmlichen Autos mit Verbrennungsmotor die Möglichkeit, die Bremsenergie nicht über Bremsscheiben in Wärme umzuwandeln, sondern über den als Generator geschalteten Elektromotor in die Batterie des Fahrzeugs rückzuspeisen. Durch diese sogenannte Rekuperation lässt sich der Wirkungsgradvorteil im Vergleich zum Auto mit Verbrennungsmotor weiter steigern. Zudem verfügen Elektromotoren über ein hohes Drehmoment, welches über einen großen Drehzahlbereich verfügbar ist. Dadurch kann auf ein herkömmliches Schaltgetriebe verzichtet werden, was sich neben einer Vereinfachung des Aufbaus positiv auf den Fahrkomfort des Fahrzeugs auswirkt [10, p. 21].

Während des Betriebs werden von rein batteriebetriebenen Fahrzeugen keine Schadstoffe emittiert. Dabei ist allerdings zu beachten, dass, sofern der für die Ladung der Batterie verwendete Strom nicht aus rein erneuerbaren Quellen erzeugt wurde, diese dabei anfallenden Emissionen in die Gesamtbetrachtung miteinbezogen werden müssen [10, pp. 21-22].

Im Vergleich zum Verbrennungsmotor haben Elektromotoren eine sehr geringe Lautstärke. Dies kommt vor allem bei Fahrten mit geringeren Geschwindigkeiten zum Tragen. Bei höheren Geschwindigkeiten wird der Effekt durch das zunehmende Abrollgeräusch der Reifen jedoch abgeschwächt [10, p. 22].

Der Aufbau eines Elektroautos ist im Vergleich zu Autos mit Verbrennungsmotor einfacher. Zusätzlich dazu ist der Gesamtwartungsaufwand aufgrund der wartungsarmen Komponenten, beispielsweise durch die rekuperationsbedingte geringere Beanspruchung der Bremsscheiben, deutlich weniger [10, p. 23].

Nachteile

Den geringen Wartungskosten sowie einem kostengünstigeren Fahrbetrieb steht vor allem der derzeit im Vergleich zu vergleichbaren Autos mit Verbrennungsmotor noch höhere Anschaffungspreis gegenüber. Darüber hinaus stellt sich die Frage der Lebensdauer der Batterie bzw. ob diese im Lauf der Lebensdauer des Fahrzeugs ersetzt werden muss [10, pp. 23-24].

Ein weiterer Nachteil ist die vor allem bei EVs mit geringerer Batteriekapazität eingeschränkte Reichweite. Zusätzlich dazu muss entsprechend der Ladeleistung mit einer längeren Ladedauer gerechnet werden. So dauert je nach Batteriekapazität der Ladevorgang an einer üblichen Haushaltssteckdose mehrere Stunden. Erst mit einer Gleichstrom-Schnellladung ist es möglich, die Dauer auf unter eine Stunde zu reduzieren [10, p. 24].

2.2 Elektrofahrzeugtypen

Im Allgemeinen werden alle Fahrzeuge, die mit Hilfe von elektrischer Energie fortbewegt werden als Elektrofahrzeuge bezeichnet. Dies gilt somit gleichermaßen für ein batteriebetriebenes Auto oder Motorrad als auch für eine Elektrolokomotive, welcher der Strom über eine Oberleitung zugeführt wird. Da der Fokus dieser Arbeit auf elektrifizierten Personenkraftwagen mit eingebauter Batterie liegt, werden im Folgenden nur diese Fahrzeugtypen betrachtet bzw. als Elektrofahrzeuge bezeichnet.

2.2.1 Hybride

Hybridfahrzeuge besitzen, anders als ein Auto mit Verbrennungsmotor, noch einen zusätzlichen Elektromotor mit einer Batterie als Energiespeicher. Während in der Literatur oft zwischen Mikro-, Mild-, Voll- und Plug-In-Hybrid unterschieden wird, haben sich bei Fahrzeugherstellern die Begriffe Parallel-Hybrid, Seriell-Hybrid und Misch-Hybrid durchgesetzt [11, pp. 40-41].

Parallel Hybride (HEV)

Bei diesem Fahrzeugtyp sind Elektro- und Verbrennungsmotor parallel mit dem Getriebe verbunden, wodurch es möglich ist, die Leistung dieser beiden zu kombinieren. Je nach Dimensionierung des Elektromotors sowie der Batterie dient der Elektroantrieb hierbei nur der Bremsenergieerückgewinnung oder kann auch eine vollelektrische Fahrweise ermöglichen [11, p. 41].

Plug-In-Hybride (PHEV)

Die der Gruppe der Misch-Hybrid angehörigen Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicle sind den Parallel-Hybriden vom Aufbau her sehr ähnlich. Hauptunterscheidung ist jedoch die größere Batterie sowie der externe Netzanschluss, mit welcher die Batterie geladen werden kann und somit bereits rein batteriebetriebene Fahrten ermöglicht [11, p. 41].

Range Extender

Ein Range-Extender-Electric-Vehicle, welches der Gruppe der Seriellen-Hybride angehört, nutzt zur Erzeugung der Traktion für die Fortbewegung des Fahrzeugs nur den Elektromotor. Fällt allerdings während des Betriebs der Ladezustand der Batterie unter einen gewissen Wert, dient der Verbrennungsmotor in Kombination mit einem Generator dazu, die Batterie wieder aufzuladen bzw. die Reichweite des Fahrzeugs zu erhöhen. Die Batteriekapazität ist dabei größer als jene von PHEVs [11, p. 43].

2.2.2 Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

Das reine Batteriefahrzeug (Batterie-Electric-Vehicle – BEV) zeichnet sich im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Hybridfahrzeugen vor allem durch den einfachen Aufbau aus, da hierbei im Wesentlichen nur ein Energiespeicher, ein Elektromotor und ein Steuergerät benötigt werden. Um eine ausreichende Reichweite zu ermöglichen ist jedoch ein entsprechend großer Energiespeicher erforderlich [11, p. 43].

2.2.3 Brennstoffzellenfahrzeuge

Beim Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) wird die chemische Energie des Wasserstoffs in der Brennstoffzelle in elektrische Energie und Wasser umgewandelt. Diese Energie wird entweder direkt für die Traktion des Elektromotors verwendet oder in einer Batterie zwischengespeichert um Nebenverbraucher zu versorgen oder Spitzenlastabdeckung zu gewährleisten [11, p. 43].

2.3 Traktionsbatterie

In Elektrofahrzeugen macht nur die Verwendung wiederaufladbarer Batterien, sogenannter Akkumulatoren oder Sekundärzellen Sinn. In dieser Arbeit wird der Terminus „Batterie“ somit gleichbedeutend mit einem Akkumulator verwendet.

2.3.1 Definitionen

Die **Energie** einer Batterie in Wattstunden [Wh] definiert die Energiemenge, welche der vollständig geladenen Batterie entnommen werden kann. Dabei wird von der Einhaltung bestimmter Betriebs- und Umgebungsparameter (z.B. Temperatur) ausgegangen.

Die sogenannte **Nennkapazität** gibt die Ladungsmenge an, welcher einer neuen und voll geladenen Batterie unter Normbedingungen entnommen werden kann, und wird in Amperestunden [Ah] angegeben.

Die **Nennspannung** gibt die mittlere Zellspannung einer Batterie bei Entladung unter Nennbedingungen an.

Die **C-Rate** definiert den Strom, den eine Batterie liefern oder annehmen kann, und wird auf die Nennkapazität der Zelle bezogen. Dies kann auch als Stundenrate bezeichnet werden, beispielsweise als 1-Stunden-Rate. Eine Batterie mit einer Nennkapazität von 2 Ah kann somit bei einer 3C-Rate mit 6 A geladen und entladen werden.

Die **Energiedichte** definiert die pro Volumeneinheit gespeicherte Energie einer Batterie und wird in Wattstunden pro Liter [Wh/l] oder Wattstunden pro Kubikmeter [Wh/m³] angegeben. Die **spezifische Energie** gibt die gespeicherte Energie bezogen auf das Gewicht der Batterie [Wh/kg] an.

Die **Leistungsdichte** definiert die Nennleistung der Batterie bezogen auf das Volumen und wird in Watt pro Liter bzw. Kubikmeter [W/l oder W/m³] angegeben. Die **spezifische Leistung** gibt die Nennleistung der Batterie bezogen auf das Gewicht [W/kg] an.

Die **Zellenspannung** ist die Differenz der Redoxpotenziale der beiden Elektroden und kann mit der elektrochemischen Spannungsreihe bestimmt werden.

Die **Entladeschlussspannung** definiert die Spannungsgrenze für die Entladung, welche nicht unterschritten werden darf. Eine Unterschreitung bzw. Tiefenentladung führt zu irreversiblen Schäden an der Batteriezelle.

Der **Innenwiderstand** bezeichnet alle inneren Widerstände einer Batterie und beinhaltet sowohl chemisch bedingte (z.B. Fließwiderstand der Ionen) wie auch rein ohmsche Widerstände.

Der **Ladezustand** einer Batterie (State of Charge – **SOC**) gibt den momentanen Ladezustand im Vergleich zur maximalen Kapazität wieder. Der **SOH** (State of Health) beschreibt den aktuellen Alterungszustand der Batterie im Vergleich zum neuwertigen Zustand. Diese beiden Zustände definieren die aktuelle Funktionalität der Batterie, den sogenannten **SOF** (State of Function). Eine alternative Darstellung zum SOC ist die Entladetiefe (Depth of Discharge – **DOD**), welche in Prozent der Gesamtkapazität dargestellt wird.

Der **Ladefaktor** beschreibt Ladungsverluste und ist definiert als der Quotient, der bei der Entladung entnommenen Ladungsmenge zu der bei der Ladung in die Batterie eingebrachten Ladungsmenge, um den Ladezustand vor der Entladung zu erreichen. Der reziproke Wert wird auch als **coulombscher Nutzungsgrad** bezeichnet.

2.3.2 Anforderungen an Traktionsbatterien

Die Traktionsbatterie ist einer der wesentlichsten Bestandteile eines Elektrofahrzeugs. Um den dabei gestellten Anforderungen zu entsprechen, soll eine Vielzahl von technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten bestmöglich erfüllt werden (siehe Abbildung 6).

Energie- und Leistungsdichte

Die Energiedichte bzw. die spezifische Energie einer Traktionsbatterie beeinflusst maßgeblich die erzielbare Reichweite eines Elektrofahrzeugs. Zwar ist es auch möglich durch eine größere bzw. schwerere Batterie eine geringe Energiedichte zu kompensieren, dies führt jedoch zu einem größeren Gesamtgewicht des Fahrzeugs, was sich wiederum negativ auf die Reichweite auswirkt [12, p. 9].

Eine hohe Leistungsdichte ist insofern von Bedeutung, da die maximale (kurzzeitig) zur Verfügung stehende Leistung einer Traktionsbatterie die mögliche Beschleunigung des Fahrzeugs definiert [12, p. 10].

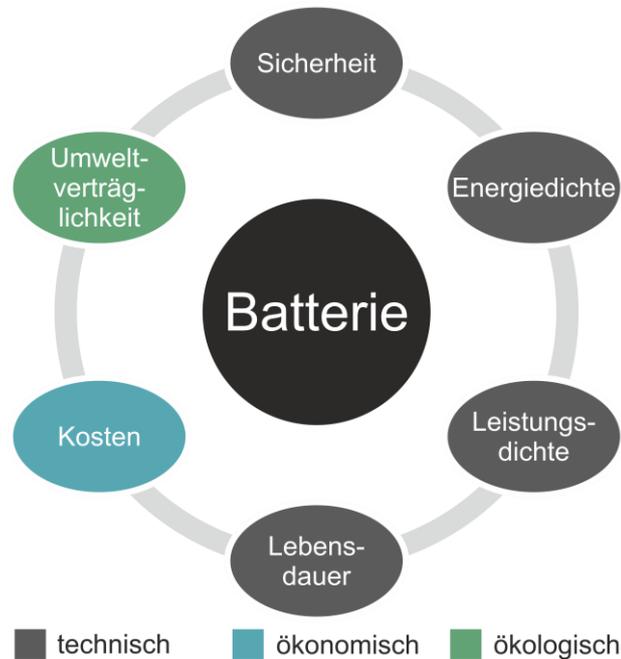


Abbildung 6: Anforderungen an Traktionsbatterien [12, p. 8]. – eigene Darstellung

Bei jeder Speichertechnologie ist bereits bei der Entwicklung in Bezug auf die verschiedenen Elektrofahrzeugtypen ein Abwägen zwischen Leistungs- bzw. Energiedichte erforderlich. Während für Hybridfahrzeuge mit geringem Elektrifizierungsgrad vor allem die Leistungsdichte für die Beschleunigung im Vordergrund steht, ist der Fokus bei rein batteriebetriebenen Fahrzeugen auf die erzielbare Reichweite und somit auf die Energiedichte gerichtet [13, pp. 406-407].

Abbildung 7 zeigt, in welchen Bereichen zwischen Energie- und Leistungsdichte aktuelle Batterietechnologien möglich sind.

Kosten

Um aus wirtschaftlicher Sicht mit Autos mit Verbrennungsmotor konkurrieren zu können, ist es erforderlich, dass vor allem die Preise der Batterien, welche einen Hauptteil der Produktionskosten für ein BEV ausmachen, zukünftig weiter reduziert werden.

Lebensdauer

Vor allem im Kontext der relativ hohen Kosten für die Batterie eines Elektroautos ist es wichtig, dass diese eine lange Lebensdauer besitzt. Das bedeutet einerseits eine hohe zyklische Lebensdauer bzw., dass möglichst viele Lade- und Entladevorgänge möglich sind, bis die Kapazität der Batterie unter einen gewissen Wert (typischerweise 80 %) fällt. Zusätzlich wird die Lebensdauer einer Batterie durch die kalendarische Lebensdauer definiert, welche angibt, wie lange die Batterie ohne Belastung funktionsfähig bleibt. Die zyklische Lebensdauer ist

dabei von der Entladetiefe der Entladezyklen abhängig, während die kalendarische Lebensdauer eher von der Temperatur und vom Ladezustand abhängig ist [14, pp. 408-412].

Sicherheit

Gerade bei der Verwendung in Fahrzeugen wird von Batterien ein hohes Maß an Sicherheit verlangt. Es ist von essentieller Bedeutung, dass bereits beim Zelldesign und bei der Konstruktion entsprechender Schutzeinrichtungen die Sicherheit während des Betriebs sowie bei Unfällen maximiert wird. So wird beispielsweise eine Lithium-Ionen-Batterie bei einem schweren Unfall sofort vom Bordnetz getrennt. Bei besonders schweren Unfällen kann es allerdings prinzipbedingt durch die große Menge an gespeicherter Energie bzw. einer unkontrollierten Freisetzung dieser zum Brand der Batterie kommen, was üblicherweise als Thermal Runaway bezeichnet wird [14, pp. 402-403].

Umweltverträglichkeit

Gerade im Hinblick auf die Klimaauswirkungen durch die Elektromobilität sowie weiterer negativer Auswirkungen durch die Produktion sowie das Recycling der Traktionsbatterie, muss der Umweltverträglichkeit erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Auch bei Kunden erhält dieser Faktor einen immer größeren Stellenwert [12, p. 12].

2.3.3 Übersicht über Batterietechnologien

Im Folgenden wird auf aktuelle Batterietechnologien sowie deren Relevanz als möglicher Energiespeicher für die Elektromobilität eingegangen. Da der Fokus dieser Arbeit auf rein batteriebetriebenen Fahrzeugen liegt und hierbei aktuell die Lithium-Ionen-Batterie die dominierende Technologie ist (siehe Kapitel 2.3.6), wird auf diese im Speziellen eingegangen. Abbildung 7 zeigt die derzeit möglichen Energie- und Leistungsdichten verschiedener Batterietechnologien.

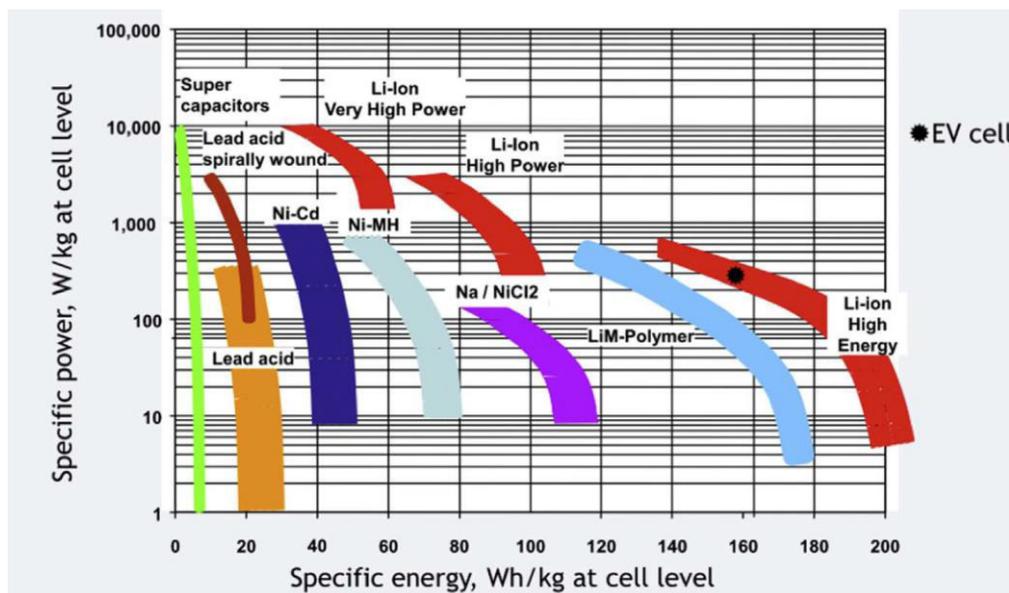


Abbildung 7: Energie- und Leistungsdichte derzeitiger Batterietechnologien [13, p. 415].

2.3.3.1 Blei-Säure-Batterie (PbA)

Blei-Säure-Batterien werden derzeit vor allem als Starterbatterien in Autos verwendet. Aufgrund der geringen Energiedichte (zwischen 20 und 40 Wh/kg – siehe Abbildung 7) ist ein Einsatz als Energiespeicher in Elektroautos jedoch mit einem sehr hohen Gewicht verbunden. Eine Reichweite von 200 km würde eine mehr als 500 kg schwere Batterie erfordern. Hinzu kommt die relativ geringe Lebensdauer sowie geringe Zyklenfestigkeit, wodurch die Blei-Säure-Batterie trotz der geringen Kosten nicht für die Verwendung in EVs berücksichtigt wird [13, p. 416].

2.3.3.2 Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH)

Nickel-Metall-Hydrid-Batterien sind in der letzten Zeit vor allem für Hybridfahrzeuge verwendet worden. Die Technologie gilt als ausgereift und wurde vor allem aufgrund der im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien, geringeren Kosten eingesetzt. Da jedoch von keiner zukünftigen Verbesserung der batteriespezifischen Eigenschaften sowie der Produktionskosten auszugehen ist, gilt die NiMH-Batterie, auch aufgrund ihrer geringen Energiedichte (zwischen 60 und 80 Wh/kg), als ungeeignet für den Betrieb von rein elektrischen Fahrzeugen [13, p. 416].

2.3.3.3 Natrium-Nickelchlorid-Batterie (ZEBRA)

Diese Technologie hat viele Vorteile, da sie als sicher und kostengünstig gilt. Die hohe Lebensdauer wird dabei auch durch hohe Entladetiefen nicht beeinträchtigt. Trotz einer zufriedenstellenden spezifischen Energie (etwa 120 Wh/kg) ist die spezifische Leistung mit 150 W/kg jedoch zu gering, als dass die ZEBRA-Batterie für den alleinigen Betrieb eines BEV in Frage kommen würde. Es bestünde jedoch die Möglichkeit, die geringe spezifische Leistung in Verbindung mit kleineren leistungsstarken Quellen wie beispielsweise einem Superkondensator zu kompensieren [15, p. 943, 13, p. 416].

2.3.4 Lithium-Ionen-Batterie (LIB)

2.3.4.1 Allgemeine Funktionsweise

Abbildung 8 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Komponenten einer Lithium-Ionen-Batterie. Diese setzt sich aus zwei Elektroden, einem Separator sowie dem Elektrolyt zusammen. Die beiden Elektroden werden Anode (negativ) und Kathode (positiv) genannt und bestehen jeweils aus einem Stromableiter und einem aktiven Material. Anders als zum Beispiel bei einer Blei-Säure-Batterie können Lithium-Ionen-Batterien aus verschiedensten Materialkombinationen realisiert werden. Ein konventionelles Kathodenmaterial ist Lithium-Kobaltoxid. Dieses wurde auch schon bei der ersten wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterie von Sony 1991 verwendet. Die Bestandteile Lithium, Kobalt und Sauerstoff treten in diesem Fall in Form einer Schichtstruktur auf. Beim Ladevorgang verlassen Lithium-Ionen das Kathodenmaterial und wandern durch den Separator in das aktive Anodenmaterial. Der Separator, welcher aus einer mikroporösen Membran besteht, um einerseits durchlässig genug für den Transport der Lithium-Ionen zu sein und andererseits den Kurzschluss zwischen den beiden Elektroden zu verhindern, weist gerade einmal eine Dicke von 15-30 µm auf. All diese Komponenten sind

von einem flüssigen ionenleitfähigen Elektrolyt umgeben, um die Beweglichkeit der Ionen sicherzustellen. Beim Ladevorgang kann nur 50 % des Lithiums verwendet werden, da es sonst zu Instabilitäten in der Kristallstruktur des Kathodenmaterials und in weiterer Folge durch freiwerdenden Sauerstoff zu Zerstörung der Zelle kommen kann. Als Anodenmaterial wird heutzutage meist Graphit verwendet. Aufgrund seiner Anordnung in Schichten (Graphenschichten) werden die Lithium-Ionen zwischen diesen eingelagert (Interkalation). Anders als beispielsweise Lithium-Kobaltoxid bleibt Graphit auch in Abwesenheit von Lithium stabil, wodurch ein beinahe vollständiger Entladevorgang möglich ist. Bei diesem verhält es sich umgekehrt zum Ladevorgang. Wie in Abbildung 8 dargestellt, wandern die Lithium-Ionen durch den Separator zurück in die positive Elektrode, während nun über den außerhalb der Batterie geschlossenen Stromkreis Elektronen ebenfalls von der negativen zur positiven Elektrode wandern [16, pp. 21-25].

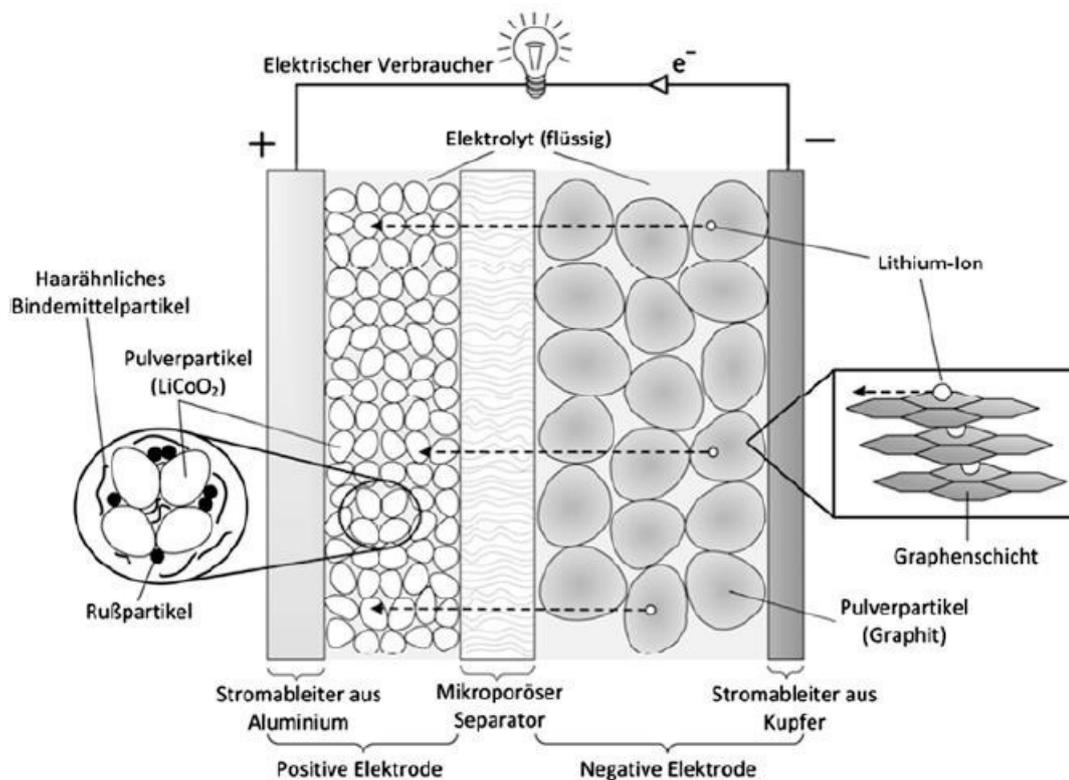


Abbildung 8: Komponenten einer konventionellen Lithium-Ionen-Batterie beim Entladevorgang [16, p. 22].

Wie bereits erwähnt, ist es möglich, unterschiedliche Materialkombinationen für die Aktivmaterialien der Elektroden zu verwenden. Nachfolgend wird auf die Eigenschaften bzw. Vor- und Nachteile der wichtigsten Aktivmaterialien eingegangen.

2.3.4.2 Kathodenmaterialien für LIB

Kathoden aus kobalthaltigen Lithiumoxiden

Aus diesen Kathodenmaterialien lassen sich die höchsten Energiedichten erzielen, wodurch sie bei mobilen Elektronikgeräten sowie im Feld der Elektromobilität führend eingesetzt werden [17, p. 230].

- **Lithium-Kobaltoxid (LCO)**

Durch die Verwendung in der ersten wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Batterie ist LCO auch heute noch sehr weit verbreitet. LCO hat eine hohe Arbeitsspannung und verfügt über eine vor allem im Vergleich zu anderen Kathodenmaterialien hohe Energiedichte. Allerdings weist es bei den Kriterien Sicherheit und Stabilität Schwächen auf. LCO-Batterien werden hauptsächlich in portablen Elektronikgeräten verwendet. Der Umstand, dass Nickel und Kobalt für die Herstellung verwendet werden, wird ebenfalls als potenzieller Nachteil von LCOs gesehen (siehe Tabelle 1) [17, p. 231, 18, p. 33, 19, p. 11].

Eigenschaften auf Zellbasis (mit Graphit Anode)	
Spannungen	Nennspannung: 3,6 V; Arbeitsbereich: 3,0-4,2 V
Kapazität	150-200 Wh/kg; bei Spezialzellen bis zu 240 Wh/kg
Laderate	0,7-1C
Entladerate	1C
Lebensdauer	500-1.000 Zyklen
Thermisches Durchgehen	150 °C

Tabelle 1: Charakteristiken von LCO [20].

- **Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide (NMC)**

NMC ist ein kommerziell sehr erfolgreiches, schichtartiges Kathodenmaterial, welches von den meisten Fahrzeugherstellern für BEVs verwendet wird. NMC-Batterien sind dabei in verschiedenen Materialkombinationen wie z.B. NMC-111 (auch NMC-333 genannt), NMC-622 oder NMC-811 möglich. Die Zahlen sind bei dieser Schreibweise gleichbedeutend mit den Stoffmengenanteilen von Ni, Mn und Co in der jeweiligen Batteriekonfiguration. NMC-111 ist bereits am Markt etabliert und zeichnet sich im Vergleich zu LCO vor allem im Vergleich zu LCO durch eine höhere Sicherheit sowie eine hohe Energiedichte aus (siehe Tabelle 2) [17, p. 231, 19, p. 11].

Eigenschaften auf Zellbasis (mit Graphit Anode)	
Spannungen	Nennspannung: 3,6-3,7 V; Arbeitsbereich: 3,0- 4,2 V
Kapazität	150-220 Wh/kg
Laderate	0,7-1C
Entladerate	1-2C
Lebensdauer	1.000-2.000 Zyklen
Thermisches Durchgehen	210 °C

Tabelle 2: Charakteristiken von NMC [20].

- **Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA)**

Das Kathodenmaterial NCA (Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid) wurde in den frühen 90er Jahren entwickelt. Aufgrund der hohen Energiedichte sowie einer hohen Leistungsdichte

werden NCA-Batterien derzeit vom Elektrofahrzeughersteller Tesla verwendet. Als nachteilig werden hier jedoch, wie auch bei LCO, die Verwendung von Nickel und Kobalt betrachtet. Auch die relativ hohen Kosten sowie die im Vergleich zu anderen Kathodenmaterialien geringere Sicherheit werden negativ angeführt (siehe Tabelle 3) [17, p. 231, 19, p. 11].

Eigenschaften auf Zellbasis (mit Graphit Anode)	
Spannungen	Nennspannung: 3,6 V; Arbeitsbereich: 3,0 – 4,2 V
Kapazität	200-260 Wh/kg; 300 Wh/kg vorhersehbar.
Laderate	0,7C, Schnellladung bei manchen Zellen möglich
Entladerate	1C
Lebensdauer	500 Zyklen
Thermisches Durchgehen	150 °C

Tabelle 3: Charakteristiken von NCA [20].

Kathoden aus Lithium-Eisen-Phosphor-Oxid (LFP oder LiFePO_4)

Das im Jahr 1997 vorgestellte Kathodenmaterial LFP zeichnet sich vor allem durch seine hohe Leistungsdichte sowie eine hohe Lebensdauer aus. Zusätzlich ist es bei LFP nahezu unmöglich, dass es zur Sauerstoffentwicklung kommt, wodurch es, im Vergleich zu den zuvor genannten Oxiden, sicherheitstechnische Vorteile mit sich bringt. Es darf auch nicht unberücksichtigt bleiben, dass kein seltenes Element wie Kobalt für die Herstellung benötigt wird. LFP ist des Weiteren ungiftig und ökologisch unbedenklich. Nachteilig ist allerdings die geringe Energiedichte (siehe Tabelle 4) [17, p. 230, 18, pp. 38-40, 19, p. 11].

Eigenschaften auf Zellbasis (mit Graphit Anode)	
Spannungen	Nennspannung: 3,2-3,3 V; Arbeitsbereich: 2,5-3,65 V
Kapazität	90-120 Wh/kg
Laderate	1C
Entladerate	1C, bis 25C bei machen Zellen
Lebensdauer	1.000-2.000 Zyklen
Thermisches Durchgehen	270 °C

Tabelle 4: Charakteristiken von LFP [20].

Kathoden aus Lithium-Mangan-Oxid (LiMn_2O_4 oder LMO)

LMO wurde für die Zellen der ersten Batterien für BEVs verwendet. Es verfügt über eine hohe Leistungsdichte und ist günstig in der Herstellung. LMO zeigt jedoch ein sehr schlechtes Zyklierverhalten, was sich in einer stetigen Abnahme der Kapazität widerspiegelt. Da dieser Effekt bei Temperaturen über 50 °C noch verstärkt wird, und solche Bedingungen in EVs durchaus auftreten können, wird LMO, auch wegen der

geringen Energiedichte, nicht mehr so häufig für den Einsatz in EVs verwendet (siehe Tabelle 5) [18, p. 37].

Eigenschaften auf Zellbasis (mit Graphit Anode)	
Spannungen	Nennspannung: 3,7 V; Arbeitsbereich: 3,0- 4,2 V
Kapazität	100-150 Wh/kg
Laderate	0,7-1C; 3C maximal
Entladerate	1C, bis zu 10C bei manchen Zellen möglich
Lebensdauer	300-700 Zyklen
Thermisches Durchgehen	250 °C

Tabelle 5: Charakteristiken von LMO [20].

2.3.4.3 Anodenmaterialien für LIB

Graphit (Gr)

Graphit ist auch durch seinen geringen Preis derzeit das Anodenmaterial der Wahl für LIBs. Allerdings kann es dabei bereits bei geringen Design- oder Ladefehlern zur Abscheidung von metallischem Lithium auf der Elektrodenoberfläche kommen, wodurch es im schlimmsten Fall zum Kurzschluss der Batterie durch Dendritbildung kommen kann [16, pp. 25-26].

Lithiumtitanat (LTO)

Eine weiters heute bereits verwendetes Anodenmaterial ist Lithiumtitanat. Dieses zeichnet sich vor allem durch die hohe Sicherheit und eine lange Lebensdauer aus. Negativ ist hierbei jedoch die im Vergleich zu Graphit geringe Speicherkapazität (siehe Tabelle 6) [16, p. 26].

Eigenschaften auf Zellbasis (mit NMC oder LMO Kathode)	
Spannungen	Nennspannung: 2,4 V; Arbeitsbereich: 1,8-2,85 V
Kapazität	50-80 Wh/kg
Laderate	Typischerweise 1C, maximal 5C
Entladerate	10C
Lebensdauer	3.000-7.000 Zyklen
Thermisches Durchgehen	Sehr sicherer LIB Typ

Tabelle 6: Charakteristiken von LTO [20].

Abbildung 9 zeigt noch einmal grafisch zusammengefasst die verschiedenen Eigenschaften aktuell verwendeter Kathoden- und Anodenmaterialien. Je weiter außen die Fläche dabei ist, desto besser schneidet das Material in der jeweiligen Kategorie ab.

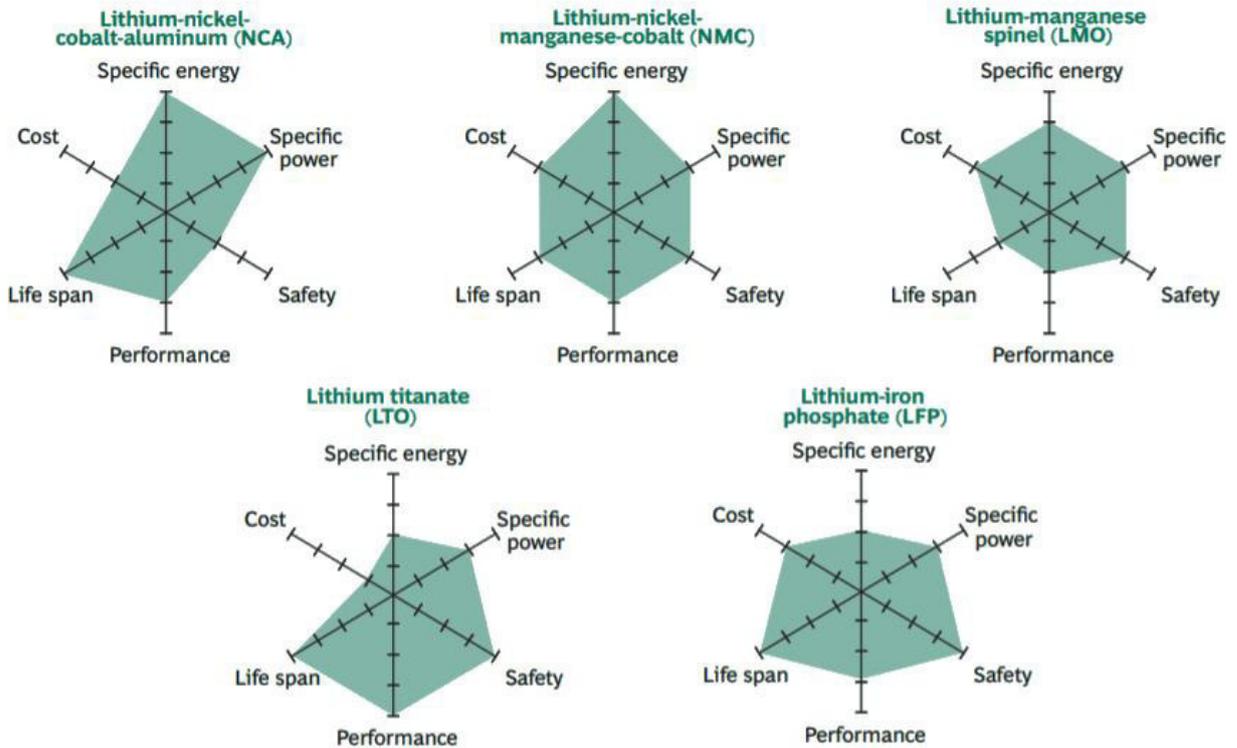


Abbildung 9: Vergleich unterschiedlicher Kathoden- und Anodenmaterialien in Bezug auf batteriespezifische Eigenschaften [21, p. 3].

2.3.4.4 Bauformen von LIB

Neben den unterschiedlichen Aktivmaterialkombinationen ist es auch möglich, die Lithium-Ionen-Batterie zelle in verschiedenen Bauformen auszuführen:

- Zylindrische Bauform
- Pouch-Zellen
- Prismatische Zellen

Auch hier haben die unterschiedlichen Varianten Vor- und Nachteile. Für die zylindrische Bauform werden die Elektroden und der Separator von Endlosrollen aus aufgewickelt und in einem Aluminium- oder Stahlgehäuse verschlossen. Vorteil dieser Bauform ist, dass sie einem gewissen Innendruck standhält ohne sich zu verformen. Nachteil sind die geringe Packungsdichte und somit auch die geringere Energiedichte, sowie die limitierte Wärmeabfuhr [14, p. 302].

Dies lässt sich vor allem bei Zellen größerer Kapazität bzw. Bauform beobachten. So entspricht das Maximum des inneren Temperaturkoeffizienten einer Zelle mit doppeltem Zelldurchmesser und konstanter Leistung bereits dem vierfachen Wert [22, p. 409].

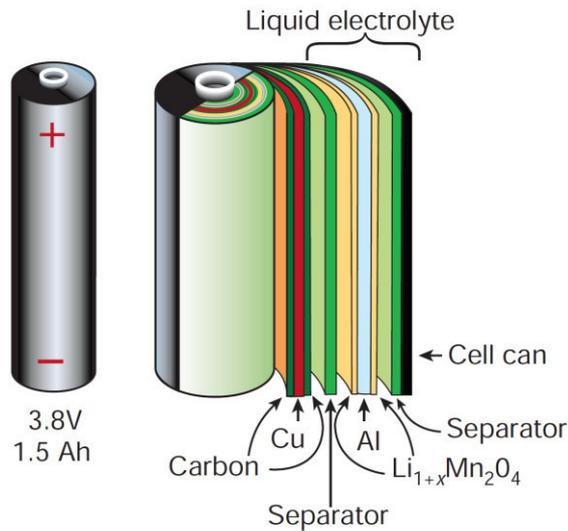


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Aufbaus einer zylindrischen Lithium Ionen Zelle [23, p. 361].

Flachzellen, auch Pouch-Zellen genannt, haben den Vorteil, dass ihre Oberfläche im Vergleich zum Volumen größer ist als bei der zylindrischen Bauform. Dadurch ist eine effiziente Kühlung dieser Zellform möglich. Zusätzlich ergibt sich durch die leichtere Bauweise eine höhere Energiedichte, was aufgrund von Materialeinsparungen auch Vorteile hinsichtlich der Produktionskosten bedeuten kann. Nachteile sind die langfristige Dichtheit sowie potenzielle Aufblähungen bei Druckaufbau [14, p. 303].

Werden die gestapelten Anoden- und Kathodenlagen nicht wie bei den Flachzellen in Aluminium- oder Plastikfolie einlaminiert, sondern in ein Hartaluminium Gehäuse gepackt, nennt man diese Anordnung eine prismatische Zelle. Diese ist vor allem aufgrund der hohen Packungsdichte sowie der hohen Biegefestigkeit für die Verwendung in BEVs interessant [14, p. 303].

2.3.4.5 Lebensdauer – Alterungseffekte

Mit der Zeit verliert jedes wiederaufladbare Batteriesystem unwiederbringlich an Speicherfähigkeit bzw. ändern sich dessen Eigenschaften. So nimmt der Innenwiderstand einer Batteriezelle mit zunehmendem Alter immer weiter zu, was mit einer geringer werdenden Leistungsfähigkeit einhergeht [24, p. 17]. Typischerweise wird das Ende der Lebensdauer einer Batterie mit der Zunahme des Innenwiderstands um 100 % sowie einer Abnahme der verfügbaren Kapazität auf 80 % des ursprünglichen Werts definiert [14, pp. 296-297].

Diese Veränderungen der Eigenschaften eines Batteriesystems lassen sich durch physikalisch-chemische Effekte erklären. So nimmt beispielsweise die Grenzschicht, welche zwischen dem Aktivmaterial der negativen Elektrode und dem Elektrolyt aufgebaut wird (sog. Solid Electrolyte Interface – SEI) und das Elektrolyt vor Zersetzung schützt, im Laufe der Lebensdauer immer weiter zu. Dabei werden in Lösung befindliche Lithium-Ionen in Verbindungen übergeführt und können daher nicht mehr elektrochemisch reagieren, was sich entsprechend negativ auf die Kapazität der Batterie auswirkt. Zusätzlich bewirkt die Zunahme

dieser Schicht einen erhöhten Stofftransportwiderstand für die Lithium-Ionen, was sich in einer Erhöhung des ohmschen Widerstands innerhalb der Batterie widerspiegelt. Auch mechanische Belastungen können Alterungsmechanismen in Batterien hervorrufen. So kann es bei der Einlagerung der Lithium-Ionen in Aktivmaterialien zu mechanischen Spannungen kommen. Diese können zu Rissen sowie dem vollständigen Auseinanderbrechen von Aktivmaterialpartikeln führen, wodurch einzelne Partikel nicht mehr elektrisch angebunden sind. Im Zuge des Einlagerungsvorgangs kann es weiters zu Dehnvorgängen aufgrund von Volumenänderungen der Partikel kommen. Dabei kann es zur Auftrennung der gezielt als elektrische Leitpfade zwischen Partikel und Stromableiter eingesetzten Kohlenstoffleitern kommen, wodurch die Partikel nicht mehr elektrisch mit dem Stromableiter verbunden sind [24, pp. 17-19].

Neben den kalendarischen und zyklischen Alterungserscheinungen ist die Lebensdauer einer Batterie allerdings auch noch von den Betriebsbedingungen, der Belastung (Fahrweise bei EVs), dem Ladeverhalten sowie den in der Batterie eingesetzten Materialien bzw. deren Qualität abhängig [25, p. 2].

Vor allem die Betriebstemperatur spielt hinsichtlich der Lebensdauer eine übergeordnete Rolle. Die optimale Betriebstemperatur liegt für LIB-Zellen zwischen 20 °C und 40 °C. Die Lebensdauer ist dabei direkt mit der Temperatur verknüpft und sinkt bei entsprechend höherer Zelltemperatur. Als Faustregel gilt dabei, dass die Lebensdauer bei einem Temperaturanstieg von 10 °C halbiert wird. Für eine Batterie, deren Lebensdauer bei 40 °C Betriebstemperatur auf 10 Jahre ausgelegt ist, würde demnach eine permanente Betriebstemperatur von 50 °C eine Reduktion der Lebensdauer auf 5 Jahre bedeuten. Höhere Temperaturen können weiters eine thermische Zersetzung des Elektrolyten bewirken, wodurch es zur Entflammung der Zelle kommen kann [25, 26, pp. 166-167]. Hohe Ladeströme bewirken eine entsprechende Erwärmung der Batteriezelle. Dabei ist unter allen Umständen zu vermeiden, dass die maximal zulässige Temperaturgrenze überschritten wird, was zum thermischen Durchgehen bzw. zur Zerstörung der Zelle führen kann. Des Weiteren kann es bei höheren Temperaturen zur Zersetzung der im Elektrolyt gelösten Salze kommen, was eine Verkürzung der Lebensdauer der Batterie bewirkt [27].

Aber auch Minustemperaturen können Alterungserscheinungen bzw. irreversible Schäden in den Zellen hervorrufen. Zusätzlich führen Temperaturen unter 20 °C dazu, dass der Innenwiderstand der Zellen überproportional ansteigt, was wiederum zu einer verminderten Leistung führt. Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt kann dieser Leistungsverlust bereits bis zu 30 % betragen bzw. noch deutlich mehr bei Temperaturen unter -20 °C [26, p. 166].

Lithium Plating

Während des Ladens bewegen sich Lithium-Ionen von der Kathodenelektrode zur Anode und interkalieren in die Graphitanodenelektrode. Wenn die Ladungsrate zunimmt, bewegen sich entsprechend mehr Lithium-Ionen von der Kathode in die Anode. Die Anzahl der Lithium-Ionen, die pro Zeiteinheit in die Graphitstruktur eingelagert werden können ist allerdings beschränkt. Bei hohen Ladungsraten können sich die Lithium-Ionen also nicht in den Graphit

bewegen, da die Kohlenstoffstellen gefüllt oder nahezu gefüllt sind und die Interkalation verlangsamt wird, was typischerweise bei hohen Ladungszuständen beobachtet wird. Infolgedessen lagern sich Lithium-Ionen als Lithiummetall auf der Oberfläche der Anode ab. Kommt es dabei zur Dendritbildung wird dadurch die Selbstentladung der Zelle beschleunigt bzw. kann es falls die Dendrite den Separator durchdringen, einen internen Kurzschluss in der Zelle zur Folge haben. Höhere Ladeströme sowie niedrige Temperatur verstärken diesen negativen Effekt. Es ist dabei möglich, mit nichtdestruktiven Methoden ein einsetzendes Lithium Plating zu detektieren und mit einem entsprechend verringerten Ladestrom diesem entgegenzuwirken [27, p. 13, 28, pp. 20-21, 53-89].

2.3.4.5.1 Untersuchungen zu zyklischen Alterungserscheinungen

Im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten Projekts MAT4BAT mit 17 Projektpartnern wurde das Alterungsverhalten einer State of the Art 16 Ah Graphit/NMC LIB für die Verwendung in Elektrofahrzeugen bei verschiedenen Entladebedingungen untersucht. Die betrachtete Pouch-Zelle des Herstellers Kokam ist seit 2013 kommerziell erhältlich und verfügt über eine spezifische Energiedichte von 148 Wh/kg [29, p. 13].

Bei der dabei durchgeführten Testprozedur wurden folgende Parameter variiert:

- **Umgebungstemperatur:** 5 °C, 25 °C, 45 °C
- **Laderate:** 1C, 2C, 3C
- **4 SOC Lade/Entladefenster:** 0-100 %, 0-80 %, 10-90 %, 20-100 %

Insgesamt wurden 46 Zellen bei 21 unterschiedlichen Rahmenbedingungen von sechs Projektpartnern untersucht, wobei alle 200 Zyklen ein Batterietest bei 25 °C durchgeführt wurde. Es wird darauf hingewiesen, dass die Umgebungstemperatur nicht der Temperatur der Zelle entspricht. Während des Tests wurde jedoch die Oberflächentemperatur der Zelle gemessen sowie ein Testabbruch eingeleitet, falls ein Temperaturanstieg auf über 60 °C registriert wurde [29, p. 16].

Auswirkungen der Umgebungstemperatur und der Laderate

Abbildung 11 zeigt die Testergebnisse für den Kapazitätsverlust bei einer Entladerate von 1C und einem SOC Zyklusfenster von 10-90 % bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen in Abhängigkeit der Anzahl der Ladezyklen. Es zeigt sich, dass sich vor allem eine niedrige Temperatur negativ auf die Lebensdauer der betrachteten LIB auswirkt. So ist in den ersten Zyklen bei einer Umgebungstemperatur von 5 °C ein starker Kapazitätsverlust zu beobachten. Die Laderate hat bei 25 °C und 45 °C eine eher geringe Auswirkung. Erst bei niedrigen Temperaturen (5 °C) zeigt sich ein negativer Einfluss auf die verfügbare Kapazität durch eine erhöhte Laderate. Auffällig ist hierbei, dass der negative Effekt durch die Ladung bei 5 °C nach einigen hundert Zyklen stark abnimmt und die Kapazität anschließend konstant bleibt [29, p. 25].

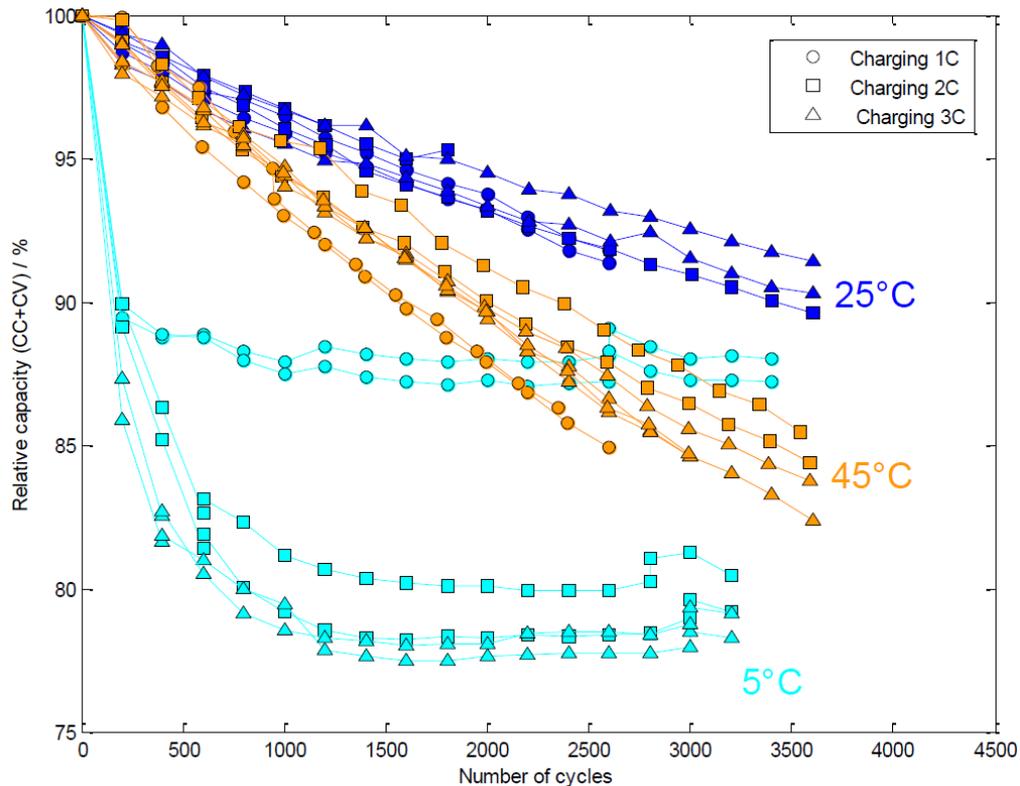


Abbildung 11: Kapazitätsverlust bei einer Entladerate von 1C und einem SOC Zyklusfenster von 10-90 % bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen in Abhängigkeit der Ladezyklen [29, p. 36].

Auswirkungen des SOC Zyklusfenster

Abbildung 12 zeigt die Testergebnisse für den Kapazitätsverlust bei einer Entladerate von 1C und einer Umgebungstemperatur von 45 °C in Abhängigkeit der Anzahl der Ladezyklen. Es lässt sich erkennen, dass die Lebensdauer der Batterie bzw. die verfügbare Kapazität sehr stark davon abhängt, ob die Batterie auf 100 % SOC geladen wird. Auch eine Entladung auf 0 % scheint einen leicht negativen Einfluss zu haben. Vergleicht man die Messergebnisse der betrachteten Batterien für ein SOC Zyklusfenster von 10-90 % mit jenem von 0-100 %, so zeigt sich, dass eine Ausnutzung der gesamten Batteriekapazität eine etwa doppelt so schnelle Degradation bewirkt. Die Laderate spielt auch bei unterschiedlichen SOC Zyklusfenstern eine untergeordnete Rolle hinsichtlich des Kapazitätsverlustes. Nur bei einer Ladung auf 100 % SOC ist hierbei eine erheblich verstärkte Batteriedegradation zu beobachten [29, p. 28].

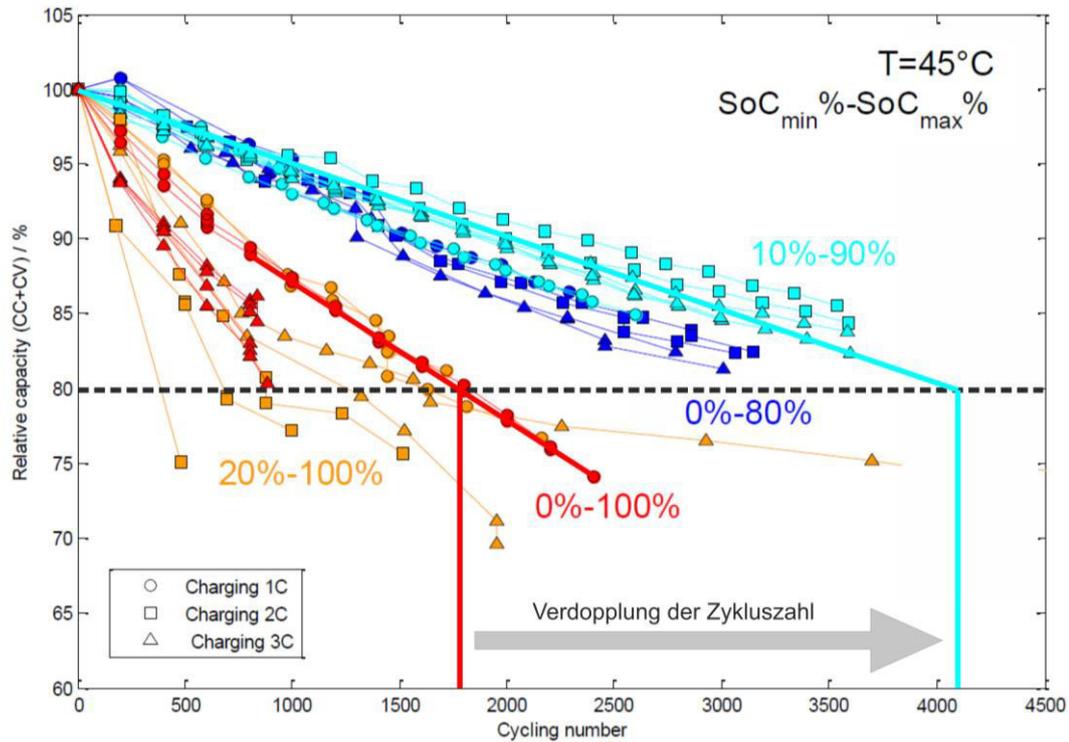


Abbildung 12: Kapazitätsverlust bei einer Entladerate von 1C und einer Umgebungstemperatur von 45 °C bei verschiedenen SOC Zyklusfenstern in Abhängigkeit der Ladezyklen [29, p. 41]. – eigene Darstellung

2.3.4.5.2 Untersuchungen zu kalendarischen Alterungserscheinungen

Die zuvor betrachtete Pouch-Zelle wurde im Rahmen des MAT4BAT auch hinsichtlich der kalendarischen Alterung untersucht. Dafür wurden verschiedene Zellen mit unterschiedlichen Ladezuständen über einige Monate unterschiedlichen konstanten Umgebungstemperaturen ausgesetzt. Die in Abbildung 13 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass hohe Temperaturen sowie ein hoher Ladezustand negative Auswirkungen auf die Lebensdauer der betrachteten NMC-LIB hat. Besonders bei hohen Temperaturen wird dabei die Degradation der Batterie durch einen hohen SOC noch zusätzlich verstärkt. Während beispielsweise bei einer Batterie mit 50 % SOC und einer Umgebungstemperatur von 60 °C nach vier Monaten ein Kapazitätsverlust von 5 % zu beobachten ist beträgt dieser bei einer Zelle mit einem SOC von 100 % bereits 30 % [30, pp. A1090-1091].

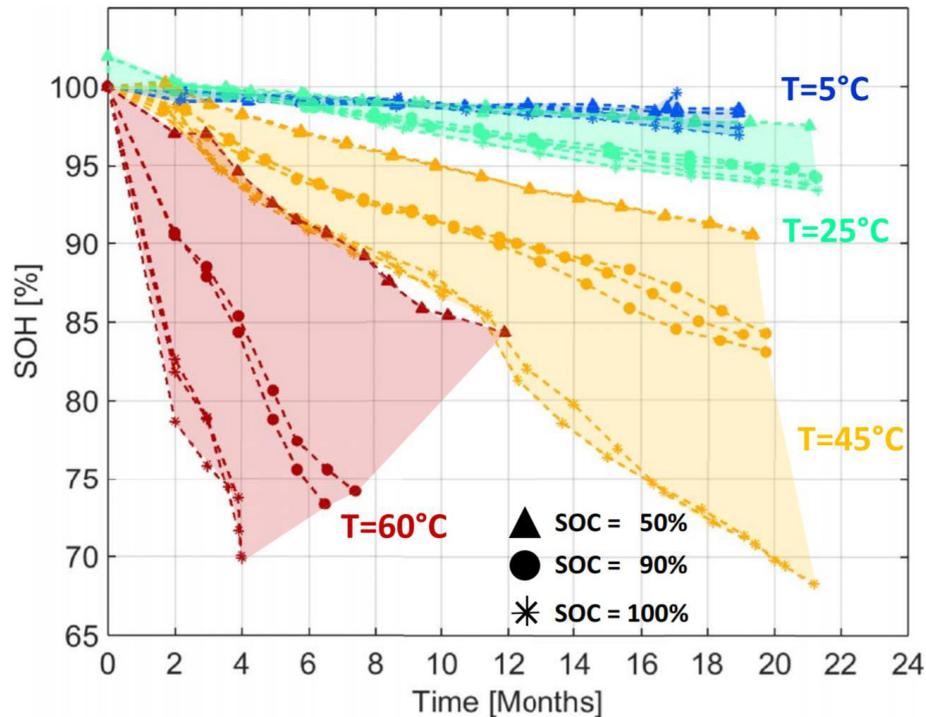


Abbildung 13: Kapazitätsverlust durch kalendarische Alterung für verschiedene Temperaturen und Ladezustände [30, p. A1090].

Insgesamt zeigt sich, dass durch eine Beschränkung des Zyklusfensters sowie der Regulierung der Batterietemperatur eine erhebliche Steigerung der Lebensdauer möglich ist. Es soll allerdings darauf hingewiesen werden, dass die betrachtete Zelle nicht repräsentativ für alle LIB Typen ist und die dargestellten Effekte je nach Typ und Hersteller in unterschiedlicher Ausprägung auftreten können.

2.3.4.6 Ladevorgang

In der Regel werden Lithium-Ionen-Batterien mit dem Constant Current – Constant Voltage (CC-CV) Ansatz, wie in Abbildung 14 dargestellt, geladen. Das bedeutet, dass die Batterie zuerst mit einem konstanten Strom bis zu einer maximal zulässigen Spannungsgrenze geladen wird. Ist diese Grenze erreicht, wird mit einer konstanten Spannung und abnehmendem Strom weitergeladen. Das Ende des Ladevorgangs wird hierbei entweder nach einer fest definierten Zeitspanne oder dem Erreichen einer vorgegebenen Stromgrenze beendet. Wichtig ist, dass die Batterie nicht über eine maximale Spannung hinaus geladen wird bzw. der maximale Ladestrom eingehalten wird, da es sonst zu Zersetzungsreaktionen sowie zur thermischen Zerstörung der Batterie kommen kann [24, pp. 15-16].

Die CC-CV-Ladung eliminiert die Nachteile einer reinen CC bzw. CV Ladung. So ist bei einer CV Ladung der potenziell hohe Ladestrom zu Beginn des Ladevorgangs problematisch, was durch den konstanten Strom in der ersten Ladephase behoben wird. Auf der anderen Seite wird durch die CV Ladung in der zweiten Phase die Möglichkeit einer Überladung bei der CC-Ladung umgangen [31, pp. 133-134].

Die Ladegeschwindigkeit des CC-CV Ansatzes ist dabei hauptsächlich von der Höhe des Ladestroms in der CC Phase abhängig bzw. wird die Ausnutzung der verfügbaren Batteriekapazität durch die Definition der maximalen Spannung in der CV Phase sichergestellt [32, p. 10].

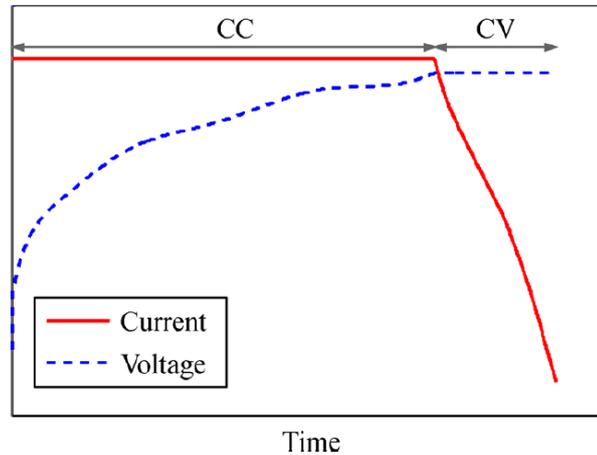


Abbildung 14: Strom und Spannung der Batterie bei Ladung mit dem CC-CV Verfahren [32, p. 10].

Ein weitere Möglichkeit für die Ladung ist der in Abbildung 15 dargestellte Multi-Stage Constant-Current-Ansatz (MCC oder MSCC), bei welchem während des gesamten Ladevorgangs konstante Ströme in die Batterie gespeist werden. Die Höhe der Ladeströme nimmt dabei je nach Stufe immer weiter ab. Die Umschaltung in eine andere Stufe wird hierbei durch die Klemmspannung der Batterie bestimmt. Erreicht diese einen definierten Wert, so wird die Ladeprozedur in eine andere Konstantstromstufe mit entsprechend verringertem Ladestrom umgewandelt. Dieser Verringerungsprozess des Ladestroms wird fortgesetzt, bis die Klemmspannung die definierte Spannungsgrenze unter der Bedingung des minimalen Stroms erreicht. Die Ladegeschwindigkeit für den Standard-MCC-Ansatz ist normalerweise etwas langsamer als der Standard-CC-CV-Ansatz mit dem gleichen Anfangsstrom [32, p. 10].

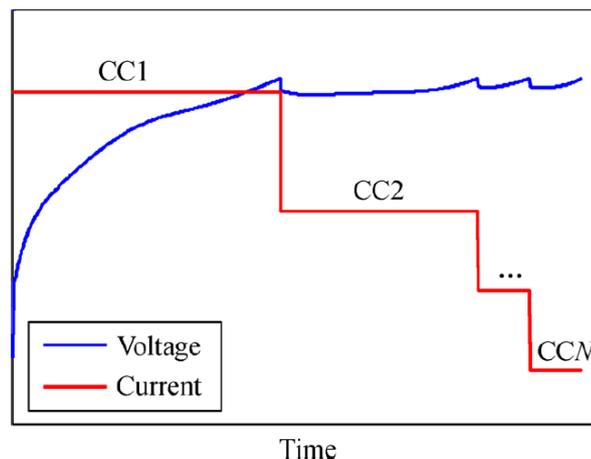


Abbildung 15: Strom und Spannung der Batterie bei Ladung mit dem MCC Verfahren [32, p. 10].

2.3.5 Aufbau einer Batterie

Wird in dieser Arbeit von einer Traktionsbatterie gesprochen, bedeutet das nicht nur einen Zusammenschluss von elektrochemischen Speichern in Form von Zellen, sondern impliziert, wie in Abbildung 16 dargestellt, ein Gesamtsystem, welches für den Betrieb in einem BEV erforderlich ist. Die Zellen, welche den Großteil des Gewichts ausmachen, werden hierzu zu Modulen und diese zu einem Gesamtsystem zusammengeschlossen. Die ursprünglich strikte Trennung zwischen den Begriffen Zelle und Batterie wird inzwischen häufig vermischt. Vor allem in Bezug auf die Energiedichte von elektrochemischen Speichern ist hier also verstärkt auf die Verwendung der Begriffe zu achten, da die theoretisch mögliche Energiedichte der verwendeten Aktivmaterialien entsprechend höher ist als jene der Zelle bzw. der gesamten Batterieeinheit. Weitere wichtige Komponenten einer Traktionsbatterie sind das Batteriemangement- und das Kühlsystem [22, p. 400].

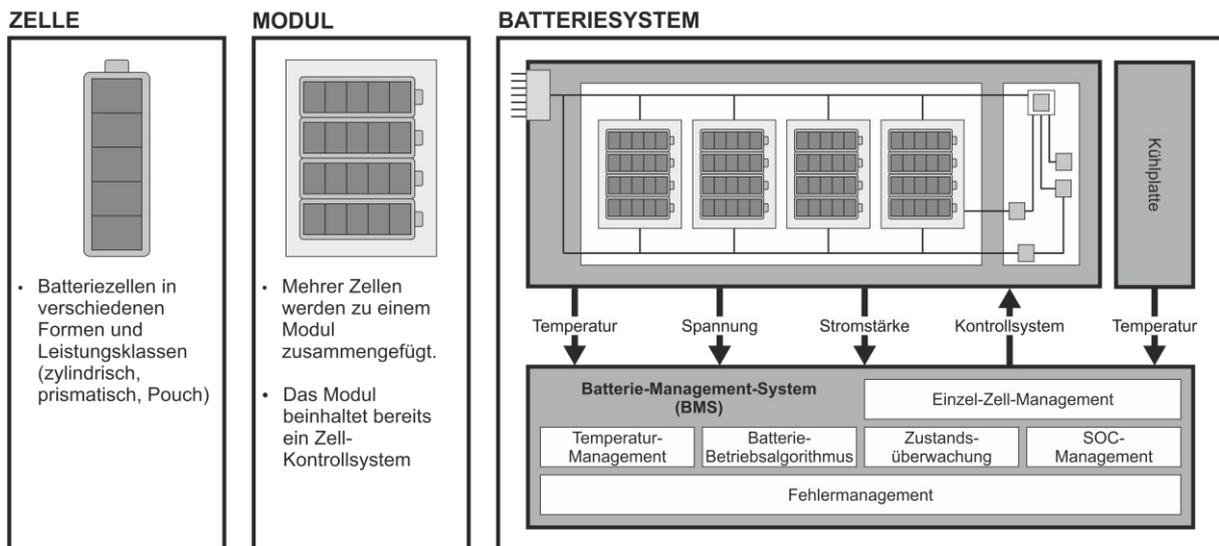


Abbildung 16: Aufbau einer Batterie für den Einsatz in EVs [33]. – eigene Darstellung

2.3.6 Verwendete Batterietechnologien für BEV

Betrachtet man die verwendeten Typen von LIB der verschiedenen Autohersteller, so lässt sich erkennen, dass es hier Unterschiede zwischen den Produktionsländern gibt. So unterscheidet sich beispielsweise der chinesische Markt aufgrund der dortigen Gesetzgebung vom Rest der Welt. LFP war dort in der Vergangenheit die einzige Technologie, die die hohen Sicherheitsanforderungen erfüllte. Zusätzlich hat die chinesische Regierung Anfang 2016 Subventionen für Fahrzeuge mit NMC-Batterien gekürzt. Diese Verordnung wurde jedoch mit Jänner 2017 zurückgezogen, wodurch NMC-Fahrzeuge wieder für Subventionen in Frage kommen. LFP wird darüber hinaus noch in wenigen nicht chinesischen Fahrzeugen verwendet. Aufgrund der im Vergleich jedoch geringen Energiedichte wird es als wahrscheinlich angesehen, dass die NMC-Batterie, welche den Rest der Welt im Bereich des EV Markts dominiert, sich auch dort durchsetzen wird. LFP hat allerdings eine höhere Leistungsdichte als NMC und könnte deshalb für Hochleistungsanwendungen, bei denen die

Energiedichte weniger entscheidend ist, eine Rolle spielen. LMO wird noch immer in manchen Fahrzeugen verwendet. Diese Technologie scheint jedoch in Zukunft durch NMC abgelöst zu werden. Ein Beispiel hierfür ist der Nissan Leaf. Während das alte Modell noch mit einer LMO-Batterie ausgerüstet war, wird im neuen Modell nun eine NMC-Batterie eingesetzt. Auch der chinesische Hersteller BYD hat angekündigt, in Zukunft unter anderem Fahrzeuge mit NMC-Batterien produzieren zu wollen. Somit scheint in der näheren Zukunft NMC die führende Technologie für Batterien für Elektrofahrzeuge zu sein [34, pp. 8-9].

Tabelle 7 zeigt die zehn meist verkauften EVs (BEV und PHEV) von 2016 und die dabei verwendete Batteriechemie.

BEV	PHEV	Anzahl der Verkäufe 2016	Batteriechemie
Tesla Model S		50.935	NCA – Gr
Nissan Leaf		49.818	NMC/LMO – Gr
	BYD Tang	31.405	LFP
	Chevrolet Volt	28.295	NMC – Gr
	Mitsubishi Outlander	27.850	LFP – Gr
BMW i3 BEV		25.576	NMC – Gr
Tesla Model X		25.372	NCA – Gr
	BYD Qin PHEV	21.686	LFP
Renault Zoe		21.626	LMO/NMC
BYD e6		20.609	LFP

Tabelle 7: Meist verkaufte EVs in 2016 inkl. verwendeter Batteriechemie [34, p. 8].

2.3.7 Zukünftige Batterietypen

Die Batteriekapazität neuer und in Zukunft erhältlicher BEVs wird immer größer. Dies bedeutet aber nicht zwangsläufig, dass dabei auch die Dimension der Batterie zunimmt. Fortschrittlichere Batterietechnologien spielen dabei ebenso eine Rolle wie eventuelle Einsparungen beim Gehäuse oder der Zellanzahl je Modul, um Material bzw. Gewicht einzusparen [34, p. 9].

Kurzfristig - Zukünftige Typen der LIB

Kurzfristig werden die aktuellen Batterietechnologien weiter verbessert werden. Aktuell scheint es zum Beispiel Trend zu sein, den Nickel Gehalt der NMC-Kathode zu erhöhen bzw. den Kobaltanteil sowie den Mangananteil auf unter 25% zu verringern. Je größer der Nickelanteil einer NMC-Batterie ist, desto größer wird der Energieinhalt. Dies geht jedoch normalerweise zu Lasten der Stabilität. Mangan wiederum wirkt sich negativ auf die Ladungsträgerkonzentration und somit auf die Leitfähigkeit aus, bewirkt aber eine bessere Zyklenstabilität. Der Kobaltanteil trägt zu einer guten elektrischen Leitfähigkeit bei, was eine höhere Performance der Batterie ermöglicht. Weiters ist zu erwähnen, dass ein höherer Nickelanteil auch höhere Prozesskosten verursacht. Derzeit ist vor allem NMC-111 weit verbreitet, aber auch NMC-622 wurde bereits in den Markt eingeführt. NMC-811 scheint aufgrund der hohen

Energiedichte vor allem für die Elektromobilität interessant, ist aber aufgrund der nachlassenden Kapazität und der Sicherheitsrisiken derzeit noch nicht für die Verwendung geeignet. Es wird auch nicht davon ausgegangen, dass diese Probleme in den nächsten Jahren ausgebessert werden können und NMC-811 in nächster Zeit in EVs eingesetzt wird [17, p. 231, 18, pp. 34-35].

Auch Tesla versucht den Kobalt-Anteil in den für ihre Fahrzeuge verwendeten NCA-Zellen weiter zu reduzieren. Ein im Mai 2018 von Tesla veröffentlichter Bericht gibt an, dass der Kobalt-Anteil ihres Kathodenmaterials bereits jetzt unter dem zukünftiger NMC-811-Zellen liegt [35]. Aktuelle Laboranalysen bestätigen, dass die Kathoden des Tesla Model 3 nur mehr zu 2,8 % aus Kobalt bestehen [36].

Bei den Anodenmaterialien stößt Graphit langsam an die theoretischen Leistungsgrenzen. Silizium könnte hier eine Abhilfe schaffen. Dies dehnt sich jedoch bei Befüllung mit Lithium aus, was die mechanische Stabilität der Zellen beeinträchtigt. Derzeit testet Tesla gerade, kleine Mengen Silizium in die Graphit-Anode einzubringen, um so die Anodenleistung zu erhöhen. Silizium in der Anode in Kombination mit dem Umstieg von NMC-333 auf NMC-622 und NMC-811 und zusätzliche Fortschritten bei anderen Zellkomponenten wie z.B. dem Elektrolyt sind Maßnahmen, welche in der näheren Zukunft die Energiedichte von LIB erhöhen können [34, p. 10].

Langfristig - Zukünftige Typen außerhalb der Lithium-Ionen Technologie

Die Energiedichte und andere Schlüsselparameter der LIB konnten in den letzten Jahren immer weiter verbessert werden. Es ist aber, vor allem aufgrund der limitierten theoretischen Energiedichten der Elektrodenmaterialien nicht zu erwarten, dass eine ähnliche Entwicklung auch in den kommenden Jahren eintritt. Zwei Batterietypen, die eine grundsätzlich unterschiedliche Zellchemie zur LIB darstellen und als Zukunftstechnologien betrachtet werden, sind die Lithium/Schwefel-Batterie (Li-S) und die Lithium/Luft-Batterie (Li-O₂). Sollten diese Technologien Marktreife erlangen, würde das hinsichtlich der Energiedichten heutiger Technologien einen Sprung bedeuten. Des Weiteren würde bei diesen Batterietypen anstatt teurer Metallverbindungen Schwefel bzw. Sauerstoff verwendet, was aus rohstofftechnischer Sicht besonders günstige Batterien ermöglichen würde. In Abbildung 17 sind die theoretischen und prognostizierten praktischen Energiedichten verschiedener wiederaufladbarer Batterietechnologien auf Zellebene dargestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Werte für die praktische Energiedichte dabei stark vom jeweiligen Zelldesign abhängig sind, bzw. am Beispiel der LIB Mittelwerte verschiedener Typen verwendet wurden [37, pp. 199-200].

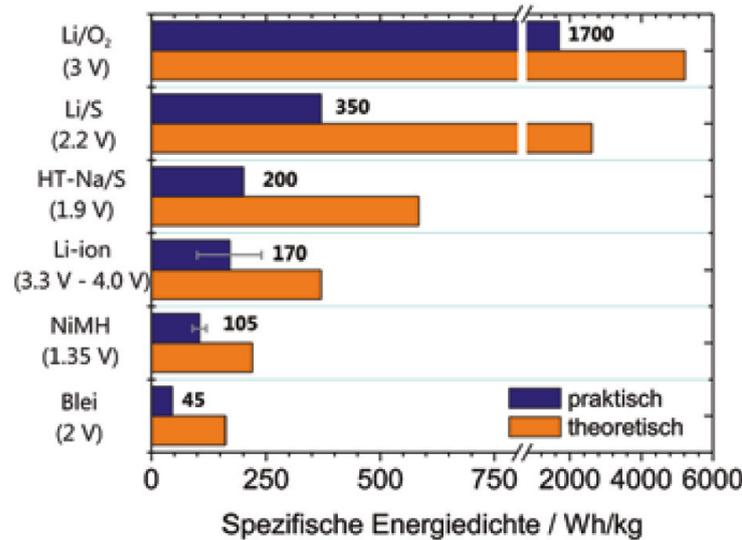


Abbildung 17: Theoretische und prognostizierte praktische Energiedichten verschiedener wiederaufladbarer Batterietechnologien bezogen auf die Zellebene [37, p. 200].

Nachfolgend wird auf die Eigenschaften bzw. Vor- und Nachteile sowie Herausforderungen bei der Entwicklung von Lithium/Schwefel- und Lithium/Luft-Batterien eingegangen.

Lithium/Schwefel-Batterie

Wie bei der LIB findet der Ladungstransport innerhalb der Zelle auch bei der Li-S-Batterie durch Lithium-Ionen statt. Der Unterschied hierbei ist jedoch, dass keine Interkalationsreaktion in den Elektrodenmaterialien stattfindet, sondern Substanzen dabei vollständig umgewandelt werden. Beim Entladen der Zelle kommt es zu einer Lösung von Lithium an der Anode, welches sich an der Kathode mit Schwefel zu verschiedenen Lithiumsulfiden verbindet. Dieser Vorgang wird beim Ladevorgang umgekehrt, wodurch die entstandenen Verbindungen wieder aufgelöst werden und sich das Lithium erneut an der Anode ablagert. Dies führt zu einer Energiedichte von 2.600 Wh/kg, welche in etwa fünfmal höher ist als die der konventionellen Li-Ionen-Batterie auf Basis von Interkalationsverbindungen. Ein weiterer Vorteil ist, dass Schwefel ein reichlich vorhandenes Material ist, dass in großen Mengen und zu geringen Kosten als Nebenprodukt der Mineralöl- und Mineralraffinierung anfällt und daher für preiswerte und energiereiche Lithiumbatterien attraktiv ist. Darüber hinaus bietet die Li-S-Batterie einen inhärenten chemischen Überladungsschutz, der die Sicherheit erhöht und insbesondere bei Multi-Zellen-Batteriepacks mit hoher Kapazität vorteilhaft sein kann. Obwohl die elektrochemische Zelle auf Schwefelbasis bereits im Jahr 1962 beschrieben wurden, konnten einige Probleme wie die geringe Schwefelausnutzung oder eine hohe Selbstentladung bis heute noch immer nicht zufriedenstellend gelöst werden. Darüber hinaus wandern die gebildeten Polysulfide im Flüssigelektrolyten durch den Separator zur Lithiummetallanode und werden dort elektrochemisch reduziert. Dieser sogenannte Shuttle Mechanismus führt zu einem schnellen Kapazitätsabbau in Li-S-Batterien. In jüngster Zeit ist das Interesse an Li-S-basierten Batterien dank der Möglichkeiten, neue nanostrukturierte Materialarchitekturen zu entwickeln und damit Probleme im Zusammenhang mit der

Leitfähigkeit zu lösen, stetig gestiegen. Darüber hinaus hat die Entwicklung neuer Elektrolyte, Bindemittel und Zelldesignkonzepte in den letzten Jahren zu bedeutenden Fortschritten auf dem Gebiet der Li-S-Batterien geführt. Es ist anzunehmen, dass Li-S-Batterien aufgrund ihres hohen Energieinhalts, ihrer hohen Leistungsfähigkeit und ihres geringen Kostenpotenzials langfristig attraktiv bleiben werden, obwohl sie sich noch in der Entwicklungsphase befinden [38, pp. 398-399].

Lithium/Luft-Batterie

Während der Entladung der Li-Luft-Zelle wird ein Lithium-Ion an einer metallischen Lithium-Anode unter der Abgabe eines Elektrons durch den Elektrolyten an die auf porösem Kohlenstoff basierende positive Elektrode abgegeben. Dort reagiert das Lithium-Ion mit Sauerstoff aus der Luft zu Lithiumperoxid Li_2O_2 bzw. Lithiumoxid Li_2O . Dieser Vorgang wird beim Ladevorgang umgekehrt und das Lithium-Ion wird an der negativen Elektrode wieder in Form von metallischem Lithium abgeschieden sowie der Sauerstoff an der positiven Elektrode an die Umgebung abgegeben. Die Energiedichte von Li-Luft-Batterien ist um eine Größenordnung höher als bei LIBs. Während sich LIBs auf Zellenebene in einem Bereich von 150-200 Wh/kg (von theoretisch möglichen 900 Wh/kg) bewegen, können Li-Luft-Batterien 3.620 Wh/kg erreichen (bei Entladung auf Li_2O_2 bei 3,1 V) oder 5.200 Wh/kg (wenn es bei 3,1 V zu Li_2O entladen wird). Wenn der "freie" Sauerstoff, der während der Entladung zugeführt und während der Ladung freigesetzt wird, nicht in die Berechnung einbezogen wird, bieten Li-Luft-Zellen Energiedichten in der Höhe von 11.000 Wh/kg was vergleichbar mit der Energiedichte von fossilen Kraftstoffen ist (Diesel: 11.800 Wh/kg, Benzin: 12.800 Wh/kg). Die Lithium-Luft-Technologie hat dabei das Potenzial, aufgrund der höheren spezifischen Energiedichte und der geringeren Kosten für die Zellkomponenten, insbesondere der kohlenstoffbasierten Kathodenmaterialien, die Kosten deutlich unter jene der LIB zu senken. Aktuelle Lithium-Luft-Batterien befinden sich noch in den experimentellen Phasen, und die Realisierung der hohen theoretischen Energiedichten sowie die praktische Anwendung dieser Technologie werden durch eine noch geringe Leistungsabgabe, eine schlechte Zyklusfähigkeit und eine geringe Energieeffizienz der Zelle limitiert. Gründe für diese Einschränkungen sind beispielsweise die Instabilität der Elektrolyte oder die Verstopfung der Kohlenstoffkathode durch abgeschiedenes Lithiumoxid. Vor allem werden der Entwicklung eines stabilen Elektrolyten sowie der Materialien für die sauerstoffatmende Kathode Schlüsselrollen bei der Entwicklung der Lithium-Luft-Batterie zugesprochen [38, p. 399].

2.3.8 Batteriemanagementsystem

Lithium-Ionen-Batterien sind besonders empfindlich gegen Überladung und Übertemperatur. Die Aufgabe eines Batteriemanagementsystems (BMS) ist daher der Schutz der einzelnen Zellen einer Batterie, um so die Lebensdauer sowie die Anzahl der möglichen Ladezyklen zu erhöhen. Als Kontrollparameter dienen dem BMS dabei die Zellspannung, die Zelltemperatur sowie der Batteriestrom. Während eine zu hohe Entladung unter ein bestimmtes Zellspannungsniveau (üblicherweise in der Nähe von 2,5 V) zu irreversiblen Schäden führt,

kann eine überhöhte Zellspannung zu spontaner Selbstentladung bzw. der Zerstörung der Zelle führen. Abbildung 18 zeigt die Funktionsbereiche einer LIB-Zelle [39, p. 177].

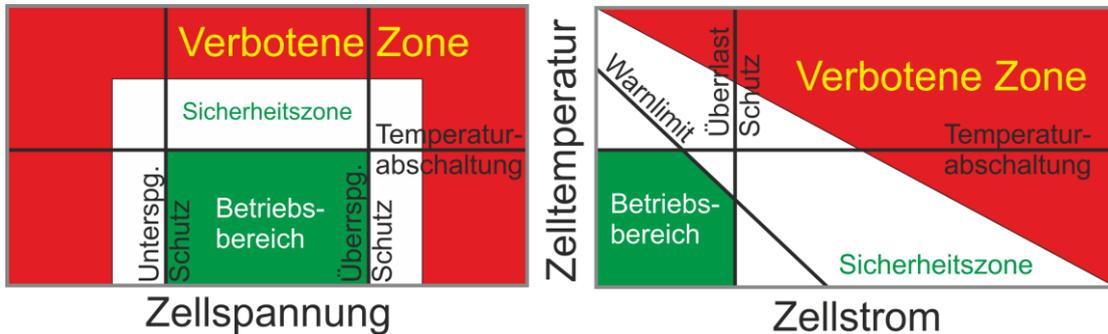


Abbildung 18: Funktionsbereich einer LIB-Zelle [39, p. 178]. – eigene Darstellung

Eine Batterie besteht üblicherweise aus mehreren Modulen, in welchen wiederum mehrere Zellen übereinandergestapelt bzw. hintereinandergeschaltet sind. Dabei kann es aufgrund von Streuungen dazu kommen, dass die Zellen eines Moduls zu Beginn des Ladevorgangs unterschiedlich viel Restladung aufweisen (siehe Abbildung 19). Um während des Ladevorgangs die Überladung einer einzelnen Zelle zu verhindern, wird jede Zelle innerhalb eines Moduls separat überwacht und gegebenenfalls ein Ladungsausgleich vorgenommen. Dementsprechend ist es im Umkehrschluss beim Entladevorgang möglich, dass eine Zelle bereits die untere Spannungsgrenze erreicht, während in den restlichen Zellen noch nutzbare Energie vorhanden wäre. Die schwächste Zelle bestimmt hier also die Leistungsfähigkeit der gesamten Batterie [39, pp. 180-181].

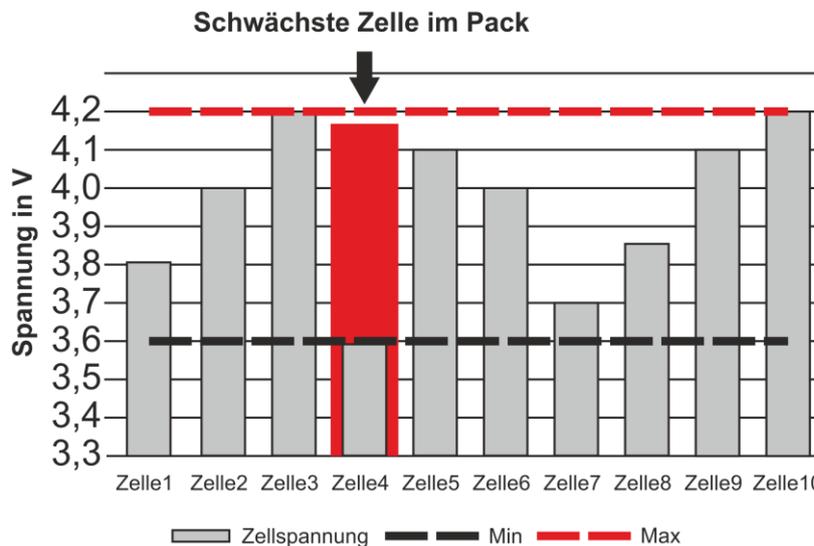


Abbildung 19: Spannungsunterschiede in den einzelnen Zellen eines Batteriemoduls [39, p. 181]. – eigene Darstellung

Für den Ladungsausgleich stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Beim passiven Ladungsausgleich wird einer Zelle ein ohmscher Widerstand parallel geschaltet, sollte diese die Spannungsobergrenze erreichen. Somit wird, um eine Überladung zu vermeiden, die

überschüssige Energie am Widerstand in Wärme umgesetzt, während die restlichen Zellen weitergeladen werden können. Da mit diesem passiven Ansatz jedoch keine Energie zwischen den Zellen transferiert werden kann, dient dieser nur dem Schutz der Zellen beim Ladungsvorgang und kann nicht zum Ladungsausgleich während des Entladevorgangs und somit einer besseren Ausnutzung der gesamten Batteriekapazität verwendet werden. Eine Alternative zum heute üblichen passiven Verfahren stellt der aktive Ladungsausgleich dar. Bei diesem kann mit Hilfe von DC/DC Wandlern sowohl beim Lade- als auch beim Entladevorgang Energie zwischen den Zellen transferiert werden. Da beim aktiven Ladungsausgleich die Energie auch nicht direkt in Wärme umgewandelt wird, sind aufgrund der deutlich geringeren Verlustleistung (nur etwa 10 % des passiven Verfahrens) hiermit auch deutlich höhere Ausgleichströme möglich, ohne das Batteriemodul und damit die Zellen an die thermischen Grenzen zu bringen [39, pp. 182-185].

2.3.9 Thermomanagement

Wie bereits zuvor erwähnt wurde, ist der Temperaturbereich, in dem die Batterie betrieben wird, essentiell für die Lebensdauer. So muss das Thermomanagement einer Batterie nicht nur für die Kühlung der Batterie sorgen, um zu hohe Temperaturen und die damit einhergehende Alterung der Zellen zu verhindern, sondern diese bei niedrigen Temperaturen heizen, um einen Leistungsverlust sowie Zellalterung beim Ladevorgang zu unterbinden. Ebenso wichtig, wie die einzelnen Zellen in einem bestimmten Temperaturfenster zu betreiben, ist außerdem, den Temperaturunterschied der Zellen untereinander auf unter 5 K zu halten. Dies soll verhindern, dass die Zellen unterschiedlich altern und so der Aufwand für den Ladungsausgleich der Zellen steigt, bzw. der nutzbare Energieinhalt der Batterie dadurch sinkt. Vor allem Batterien mit hoher Kapazität und damit einhergehend großen Abmessungen stellen das Thermomanagement in Bezug auf Temperaturhomogenität vor Herausforderungen. Abbildung 20 zeigt die Aufgaben des Thermomanagements im Zusammenhang mit der Betriebstemperatur sowie die dabei auftretenden Batterieeigenschaften und Alterungseffekte [26, pp. 166-167].

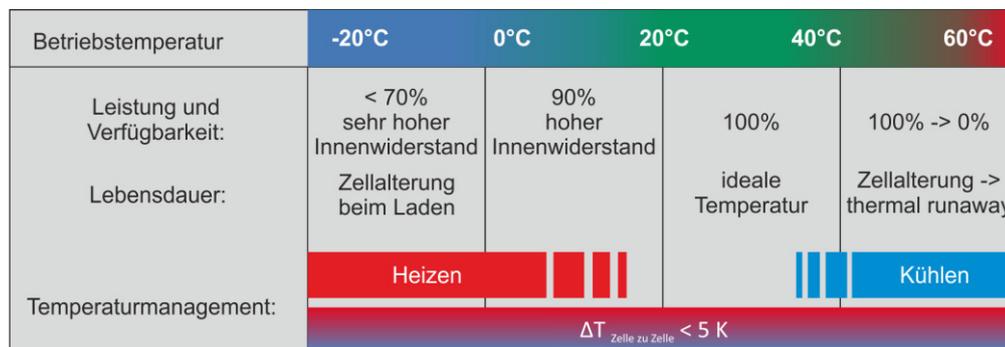


Abbildung 20: Aufgaben des Thermomanagements in Abhängigkeit der Betriebstemperatur [26, p. 166]. – eigene Darstellung

Batteriekühlung

Da der Temperaturunterschied zwischen der Umgebungstemperatur und der maximal zulässigen Batterietemperatur zu gering ist, ist Umgebungsluft für die Batteriekühlung vor allem im Sommer ungeeignet. Um die Batterien im idealen Temperaturfenster zu halten wird deshalb eine aktive Batteriekühlung benötigt. Eine Möglichkeit ist hierbei, den Kühlkreislauf der Klimaanlage zu verwenden, um die Batterie mit konditionierter Luft zu kühlen. Nachteile sind allerdings die dabei benötigten großen Luftführungskanäle sowie die im Vergleich geringe Effizienz. Alternativ kann die Batterie direkt mit Kältemittel gekühlt werden, wozu ein kompakter Verdampfer im Inneren der Batterie verbaut wird. Die für die Verdampfung des Kältemittels benötigte Wärmeenergie wird dabei direkt den Batteriezellen entzogen. Eine weitere Möglichkeit ist die Kühlung der Batterie mit Kühlmittel mittels eines Sekundärkreislaufs. Ein sogenannter Chiller verbindet dabei den sekundären Kühlkreislauf mit dem Kältekreislauf. Für die Verdampfung des Kältemittels im Chiller wird die benötigte Wärmeenergie dabei dem Kühlmittel im Sekundärkreislauf entzogen [26, pp. 169-172].

Batteriebeheizung

Anders als bei Autos mit Verbrennungsmotor steht Wärme bei EVs nicht in solchem Übermaß in Form von Verlustleistung zur Verfügung. Bei BEVs muss bei kalten Temperaturen also ein Teil der elektrischen Energie aus der Batterie für die Heizung der Batterie verwendet werden, was sich entsprechend negativ auf den Energieverbrauch sowie die Reichweite des Fahrzeugs auswirkt. Die Heizung kann dabei beispielsweise, wie auch die Batteriekühlung, mit Luft erfolgen. Dabei kann die Kabinenheizung oder ein elektrisches Heizelement direkt am Ansaugluftstrom der Batterie als Heizquelle verwendet werden. Wird die Kühlung der Batterie mittels Kühlmittel durchgeführt, kann dieser Thermokreislauf auch für die Beheizung verwendet werden. Die Wärme wird dabei über einen Hochvolt-Flüssigkeitserhitzer in den Kreislauf eingebracht. Alternativ ist es auch möglich, die Batterie durch elektrische Heizelemente zu heizen, welche in Form von großflächigen Thermofolien in Zellennähe oder auch an den Außenflächen des Batteriegehäuses angebracht sind [26, pp. 172-174].

2.4 Ladeinfrastruktur

Für den Betrieb von EVs ist eine vorhandene Ladeinfrastruktur, sei es zu Hause, bei der Arbeit oder an öffentlichen Orten, unverzichtbar. Nachfolgend wird auf die weltweit bestehenden Standards sowie die Entwicklung bzw. Prognose der zukünftigen Ladeinfrastruktur für EVs eingegangen.

Standards und Ladearten

Ladestationen können anhand von drei Hauptcharakteristiken unterteilt werden: der Ladeleistung, dem Steckertyp sowie dem Kommunikationsprotokoll zwischen Ladestation und Fahrzeug. Einzelne oder Kombinationen dieser Merkmale werden dabei in Normen definiert. Zu den wichtigsten Normungsgremien für die Entwicklung der Standards für die Ladeinfrastruktur für EVs gehören neben der Internationalen Organisation für Normung (ISO)

auch die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC), die Society of Automotive Engineers (SAE) der Vereinigten Staaten sowie die Standardization Administration of China (SAC), welche die nationalen chinesischen Standards herausgibt (GuoBiao, GB). Neben diesen Gremien entstanden in den letzten Jahren auch Vereinigungen wie CHAdeMO und CharIn, in welchen Fahrzeughersteller gemeinsam an Ladestandards arbeiten [5, pp. 29-30].

Auch für die unterschiedlichen Arten der Ladung sowie Ladeleistungen gibt es in den Normen verschiedene Unterscheidungen und Terminologien. Wird beispielsweise in der in Nordamerika verwendeten Norm SAE J1772 zwischen drei Level unterschieden, unterscheidet man die Ladeleistungen in der in Europa verwendeten IEC 62196 in vier Modi, basierend auf den Spezifikationen der IEC 61851-1 [40, p. 28].

Prinzipiell lässt sich bei der Ladung von EVs zwischen Wechselspannungsladung (AC-Ladung) und Gleichspannungsladung (DC-Ladung) unterscheiden, wobei diese je nach zusätzlicher Spezifikation in der IEC 62196 in folgende Lademodi unterteilt sind:

- **Mode 1**

Der Mode 1 beschreibt die Ladung eines Fahrzeugs mit Wechselstrom an einer Haushaltssteckdose (Schutzkontakt oder CEE-Steckdose) mit maximal 16 A, wobei das Ladegerät im Fahrzeug verbaut ist. Hierbei besteht keine zusätzliche Absicherung oder Kommunikation zwischen Fahrzeug und Netz. Es gilt dabei zu beachten, dass die verwendete Steckdose mit einem Fehlerstromschutzschalter (FI-Schutzschalter) ausgestattet sein muss [41, p. 9].

- **Mode 2**

Auch beim Mode 2 wird die Wechselstromladung über eine Haushaltssteckdose (Schutzkontakt oder CEE-Steckdose) beschrieben, wobei Ströme bis zu 32 A möglich sind. Anders als bei Mode 1 besitzt das Ladekabel hierbei eine sogenannte In-Cable-Control-Box (ICCB), welche einen FI-Schutzschalter integriert hat und zusätzlich mit dem Fahrzeug kommunizieren kann [41, p. 9].

- **Mode 3**

Dieser Mode beschreibt die Wechselstromladung an Ladestationen, welche gemäß der in der IEC 61851 bestimmten Definitionen errichtet sind. Mit Strömen bis zu 63 A ist dabei eine Ladeleistung von bis zu 43,5 kW möglich. Auch hier ist eine Kommunikation zwischen Ladestation und Fahrzeug vorhanden, wobei die Steuer- und Schutzfunktionen in der Ladestation bzw. das Ladegerät im Fahrzeug verbaut sind. Die Steckverbindung wird sowohl beim Fahrzeug als auch bei der Ladestation während des Ladevorgangs verriegelt [41, p. 9].

- **Mode 4**

Der Mode 4 definiert die Ladung des Fahrzeugs mit Gleichstrom bis zu 400 A. Dabei wird das Ladegerät in der Ladestation verbaut, in welcher sich auch die Steuer- und Schutzfunktionen befinden. Auch hier wird der Ladestecker während des Ladevorgangs verriegelt [41, p. 9].

Tabelle 8 zeigt noch einmal zusammengefasst die in der IEC 61851-1 definierten Ladebetriebsarten.

Ladebetriebsart	Kommunikation	Sicherheit	Strom und Leistung
Mode 1 Wechselstrom (AC)	Keine	Verriegelung im Fahrzeug	Einphasig: max. 16 A, 3,7 kW Dreiphasig max. 16 A, 11,0 kW
Mode 2 Wechselstrom (AC)	Nur zwischen ICCB und EV	Verriegelung im Fahrzeug	Einphasig: max. 32 A, 7,4 kW Dreiphasig: max. 32 A, 22,0 kW
Mode 3 Wechselstrom (AC)	Zwischen Ladestation und EV	Verriegelung im Fahrzeug und in der Ladedose	Einphasig: max. 63 A, 14,5 kW Dreiphasig: max. 63 A, 43,5 kW
Mode 4 Gleichstrom (DC)	Zwischen Ladestation und EV	Hohe Anforderungen, noch nicht definiert	Noch nicht definiert (vorr.: bis zu 400 A)

Tabelle 8: Ladebetriebsarten laut IEC 61851-1 [40, p. 28].

Zusätzlich zu diesen Modi lässt sich eine weitere Klassifikation der Ladearten hinsichtlich der Ladeleistung treffen. Derzeit gibt es jedoch keine eindeutige Definition, ab welcher Leistung ein Ladevorgang als Schnellladung bezeichnet wird. In manchen Studien wird eine Ladeleistung von unter 22 kW als Langsam- oder Normalladung definiert, bzw. für Ladeleistungen über 22 kW der Begriff Schnellladung verwendet [5, p. 30]. In anderen Publikationen wird ab einer Ladeleistung von über 40 kW von einer Schnellladung gesprochen [40, p. 29].

Steckverbindungen

Je nach Region und Ladeart werden unterschiedliche Steckverbindungen für die Ladung von EVs verwendet. Derzeit werden mehrere Elektrofahrzeugmodelle produziert welche mit CHAdeMO-Ladestationen geladen werden können, wobei diese Steckverbindung hauptsächlich in Japan verbreitet ist. Vor allem das von CharIN geförderte Combined Charging System (CCS) mit den zugehörigen und in Europa und den USA verbreiteten CCS Combo Steckverbindungen gilt laut der IEA als eine der vielversprechendsten Ansätze für eine globale Ladelösung [5, pp. 29-31].

Tabelle 9 zeigt die Spezifikationen der derzeit gängigen Steckverbindungen.

Standardzugehörigkeit	Bemessungswerte	Abbildung der Steckverbindung
Japanischer Chademo-Standard	$U_{\max} = 600 \text{ V}$ $I_{\max} = 200 \text{ A}$	
Chinesischer GB-Standard	$U_{\max} = 750 \text{ V}$ $I_{\max} = 250 \text{ A}$	
DC-Low mit Typ 1 nach IEC 62196-2	$U_{\max} = 600 \text{ V}$ $I_{\max} = 80 \text{ A}$	
DC-Low mit Typ 2 nach IEC 62196-2	$U_{\max} = 480 \text{ V}$ $I_{\max} = 80 \text{ A}$	
CCS mit Typ 1 nach IEC 62196-2	$U_{\max} = 600 \text{ V}$ $I_{\max} = 200 \text{ A}$	
CCS mit Typ 2 nach IEC 62196-2	$U_{\max} = 850 \text{ V}$ $I_{\max} = 200 \text{ A}$	

Tabelle 9: Spezifikationen der Schnittstellenarten [40, p. 35].

Entwicklung der Ladeinfrastruktur

Die IEA geht unter der Annahme, dass jedes EV mit einer privaten Ladestation (Zuhause oder am Arbeitsplatz) verknüpft ist, davon aus, dass die Anzahl der weltweiten Ladestationen 2016 die Marke von zwei Millionen übersprungen hat. Die Anzahl der öffentlich zugänglichen Ladestationen beträgt dabei etwa 330.000, wobei ein Drittel davon Schnellladestationen mit einer Ladeleistung von mehr als 22 kW sind. Die steigende Anzahl an Elektrofahrzeugen spiegelt sich auch in den jährlichen Wachstumsraten der öffentlich zugänglichen Ladestationen, wie in Abbildung 21 dargestellt, wider [5, p. 31].

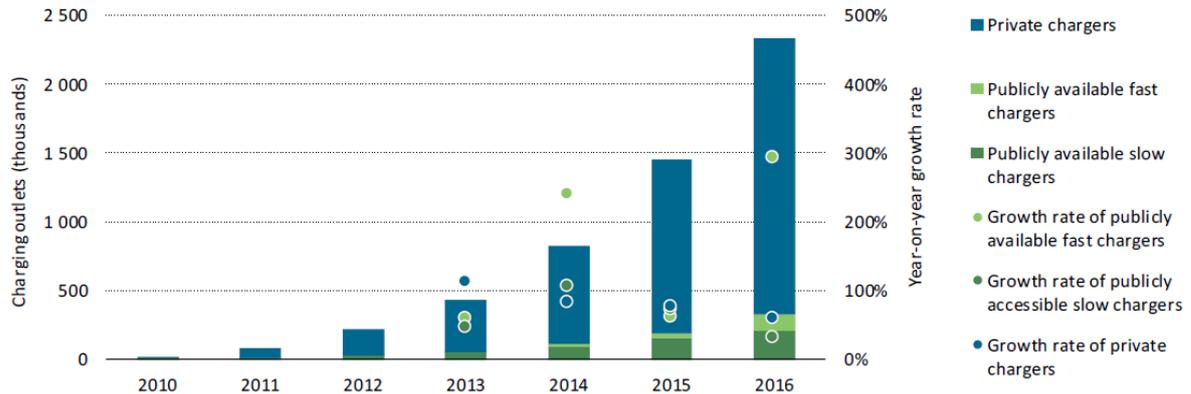


Abbildung 21: Entwicklung der Anzahl von Ladestationen von 2010 bis 2016 [5, p. 31].

Betrachtet man dabei die Aufteilung der Ladestationen auf die jeweiligen Länder, so zeigt sich, dass hier China mit einem Anteil von 25 % bei Langsamladestationen und 81 % bei Schnellladestationen führend ist. Dies kann auch darauf zurückgeführt werden, dass in China ein rapider Zuwachs an elektrifizierten Bussen beobachtet werden kann, wobei unklar ist, wie groß der Anteil an rein für Busse verwendbaren Ladestationen ist. Allgemein lässt sich, wie in Abbildung 22 dargestellt, erkennen, dass sich der Anteil an EVs in einem Land nicht mit der weltweiten Verteilung der Ladestationen deckt [5, p. 32].

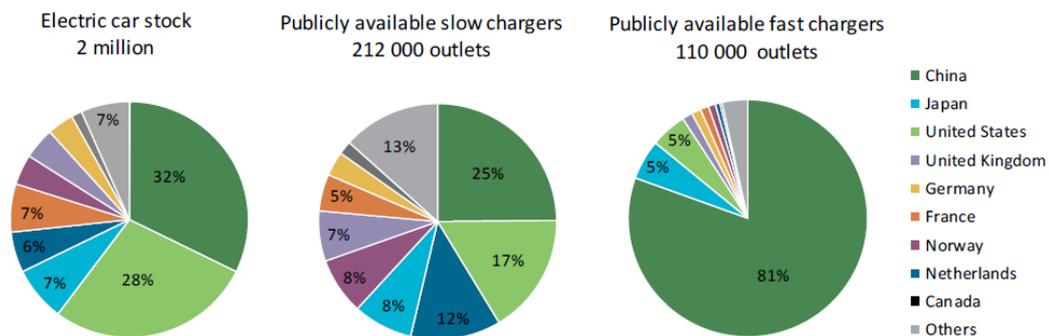


Abbildung 22: Aufteilung des globalen EV-Bestands und der Ladestationen auf die jeweiligen Länder. [5]

Ein Joint Venture aus BMW Group, Daimler, Ford und der Volkswagen AG mit dem Namen Ionity plant bis zum Jahr 2020 die Errichtung von rund 400 Schnellladestationen im Abstand von durchschnittlich 120 Kilometern entlang der Hauptverkehrsstrecken in Europa. Bis zum Ende des Jahres 2018 sollen bereits 100 Stationen mit bis zu sechs Ladepunkten in Betrieb gehen. Die Ladestationen verfügen dabei über den europäischen CCS Standard mit einer unterstützten Ladeleistung von 350 kW pro Ladepunkt [42]. Auch der Automobilhersteller Tesla baut seit 2012 sein nur für Tesla Fahrzeuge nutzbares Ladenetzwerk immer weiter aus. So gibt es derzeit weltweit über 1.229 der sogenannten Supercharger-Stationen mit insgesamt 9.623 Ladeplätzen und mit einer Ladeleistung von bis zu 145 kW [43, 44].

Der größte Anbieter von Ladepunkten in Österreich ist der Verband für Elektromobilität in Österreich (BEÖ), welchem elf regionale und kommunale Energieversorger angehören. Der

2015 gegründete Verein hat es sich zum Ziel gesetzt, die Mobilität in Österreich durch den Einsatz erneuerbarer Energien auf Elektromobilität umzustellen und betreibt derzeit an 901 Standpunkten 1.946 Ladepunkte [45]. Der österreichische Anbieter Smatrics (eine Kooperation zwischen Siemens und dem Energieversorger Verbund) verfügt mit derzeit 435 Ladepunkten an über 150 Standorten, wovon 210 mit einer Leistung von 43 kW bzw. 50 kW ausgestattet sind, über das größte Netz an Schnellladestationen in Österreich [46]. Insgesamt gibt es in Österreich derzeit 2.746 Ladestationen mit 9.494 Anschlusspunkten [47].

2.5 Potenzielle Materialengpässe und geostrategische Lage

Durch die weltweite Steigerung der Elektromobilität stellt sich die Frage, inwieweit die Versorgung mit essentiellen Materialien für die LIB-Produktion zukünftig gegeben ist. In diesem Teil der Arbeit werden die kritischen Metalle hinsichtlich möglicher Versorgungsengpässe sowie ihrer geostrategischen Lage betrachtet.

Abbildung 23 zeigt dazu die Top 3 Produktionsländer für Metalle, welche für die Produktion von LIBs von Bedeutung sind. Auffällig ist hierbei, dass es vor allem für Kobalt und Graphit zu einer sehr hohen Konzentration der Produktion auf einzelne Länder kommt. So hat sich etwa der Anteil der Demokratischen Republik Kongo an der weltweiten Kobaltproduktion von 2005 bis 2015 von etwa 40 % auf über 50 % gesteigert. Noch konzentrierter zeigt sich die Graphitproduktion, für welche sich mit über 65 % China verantwortlich zeigt [17, p. 232].

Dieser Umstand wird von Olivetti und Kollegen [17] als kritisch angesehen, da eine Versorgungsunterbrechung durch eine veränderte Regierungspolitik oder eine sozialpolitische Instabilität verursacht werden kann. Störungen im Materialangebot können dabei zu kurzfristigen Lieferlücken führen, welche erhebliche Preisvolatilitäten und Rohstoffpreisunsicherheiten verursachen können. Eventuelle Probleme werden für Kobalt, Lithium und eventuell Graphit, nicht aber für Nickel und Mangan erkannt, von welchen auch nur ein kleiner Teil der gesamtproduzierten Menge für LIBs verwendet wird [17, p. 232].

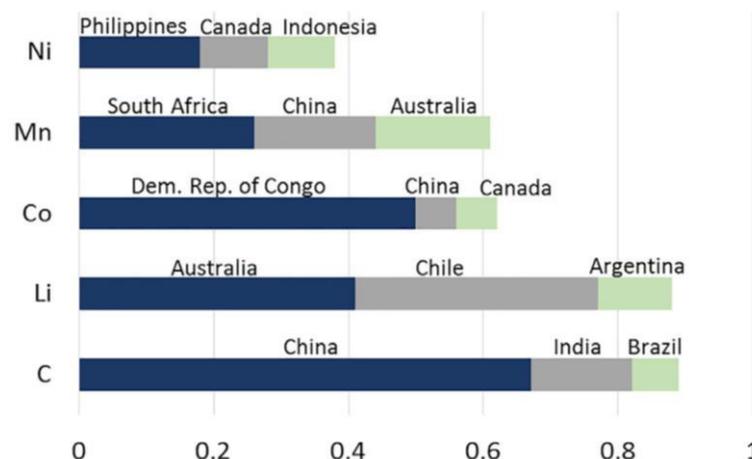


Abbildung 23: Anteile der Top 3 Produktionsländer der jeweiligen Ressource an der Weltproduktion für das Jahr 2015 [17, p. 232].

Graphit

Der Hauptsorgepunkt bei Graphit ist, dass es hauptsächlich in China abgebaut wird, wobei 2013 nur etwa 2 % der globalen Produktion für die Herstellung von LIBs verwendet wurde. Es wird allerdings angenommen, dass dieser Wert in den nächsten Jahren auf 10 % steigen könnte. 2010 wurde Graphit von der europäischen Kommission auf die Liste der 14 kritischen mineralischen Rohstoffe gesetzt. Graphit kommt in der Erdkruste jedoch relativ häufig vor und so gibt es beispielsweise in Indien, Brasilien und Afrika das Potenzial, die weltweite Förderung zu steigern, womit die Sorge der Konzentriertheit von kurzfristiger Natur zu sein scheint. Weiters besteht die Möglichkeit, synthetisches Graphit einzusetzen, wovon in den USA 2013 etwa 130 kt produziert wurden. Derzeit wird für LIB ein Mix aus natürlichem und synthetischem Graphit verwendet. Synthetisches Graphit ist dabei in der Herstellung jedoch momentan bis zu zweimal so teuer [17, p. 233].

Lithium

Die Verfügbarkeit von Lithium für LIBs ist ein kontroverses Thema. Aufgrund unterschiedlicher Annahmen hinsichtlich der projizierten zukünftigen Versorgung, insbesondere bei der Lagerstättenkonzentration, kommen Studien hier zu stark variierenden Ergebnissen. Die meisten Studien gehen aber davon aus, dass der zukünftige Bedarf durch die vorhandenen Reserven gedeckt sein wird. Lithium hat dabei den Vorteil, dass es mit Hilfe verschiedener Extraktionstechnologien gewonnen werden kann. Eine Möglichkeit ist die Verdampfung von Salzlake aus Salzseen. Hierbei werden Verunreinigungen aus der zuvor konzentrierten Lithiumsole entfernt und unter Zugabe von Soda eine Ausfällung des Lithiums in Form von Lithiumcarbonat (Li_2CO_3) erreicht. Eine weitere Möglichkeit ist die Auslaugung von Lithium-Pegmatiten, was jedoch mit höheren Kosten als bei der Sole-Verdampfung verbunden ist [17, pp. 233-234].

In wissenschaftlichen Studien werden für die Angabe der Vorkommen oft Begriffe wie Lithium-Inhalt (Li-inh.) oder Lithium-Carbonate-Equivalent (LCE) verwendet. Dazu ist anzumerken, dass aus Lithiumcarbonat nur etwa 20 % Lithium gewonnen werden kann. Aktuelle Studien prognostizieren die aktuellen, weltweiten Reserven mit 14,5-19 Mio. t Li-inh. sowie Ressourcen von 41-51 Mio. t Li-inh. Die weltweit größten Ressourcen befinden sich im sogenannten „Lithium Triangle“ in Südamerika. Dabei handelt es sich um ein Gebiet zwischen Bolivien, Argentinien und Chile. Aber auch in Europa gibt es Lithiumvorkommen. Das größte befindet sich dabei mit einer Ressource von etwa 1,3 Mio. t Li-inh. in Tschechien. Weitere Vorkommen gibt es beispielsweise in Serbien, Deutschland, Österreich (Kärnten – Koralpe) und Finnland [48, pp. 15, 25, 80-81, 88].

Die derzeitige Weltproduktion ist nicht auf eine Extraktionstechnologie fixiert. Während Chile und Argentinien Lithiumkarbonat mit Hilfe von Sole-Verdampfung extrahieren, wird in Australien die Auslaugung aus Spodumene, einem Lithium-Mineral angewandt. China, welches beide Methoden anwendet, bezieht derzeit etwa 50 % des weltweit gehandelten Lithiums. Dies ist vor allem auf die dort stattfindende LIB-Produktion zurückzuführen. Während die Wachstumsrate der LIB-Produktion in den letzten Jahren um 73 % gestiegen ist (2010 bis

2014), blieb diese bei der Lithiumproduktion mit 28 % deutlich dahinter, weshalb aktuelle Studien etwaige zukünftige Versorgungsprobleme nicht auf die Ressourcenknappheit, sondern auf die möglicherweise nicht schnell genug hochskalierbare Produktion zurückführen. Auch Bedenken hinsichtlich des potenziellen Engpasses in der Lieferkette zwischen angereichertem Lithiumcarbonat und Material in Batteriequalität werden geäußert. Einige Studien gehen auch davon aus, dass mit Hilfe von Recycling von LIBs etwaige Engpässe vermieden werden können. Aufgrund der momentan geringen Anzahl an EVs bzw. deren LIBs, die das Ende der Lebensdauer erreichen, ist allerdings nicht zu erwarten, dass in der näheren Zukunft ein signifikanter Teil der Lithium Versorgung durch Recycling gedeckt wird [17, pp. 233-234].

Abbildung 24 zeigt die weltweiten Handelswerte von Lithium Oxid, Lithium Hydroxid und Lithiumkarbonat. Allerdings wird hier Lithiumkonzentrat nicht berücksichtigt, bei welchem der Handel von Australien dominiert wird. Importe werden dabei in grün, Exporte in rot dargestellt.

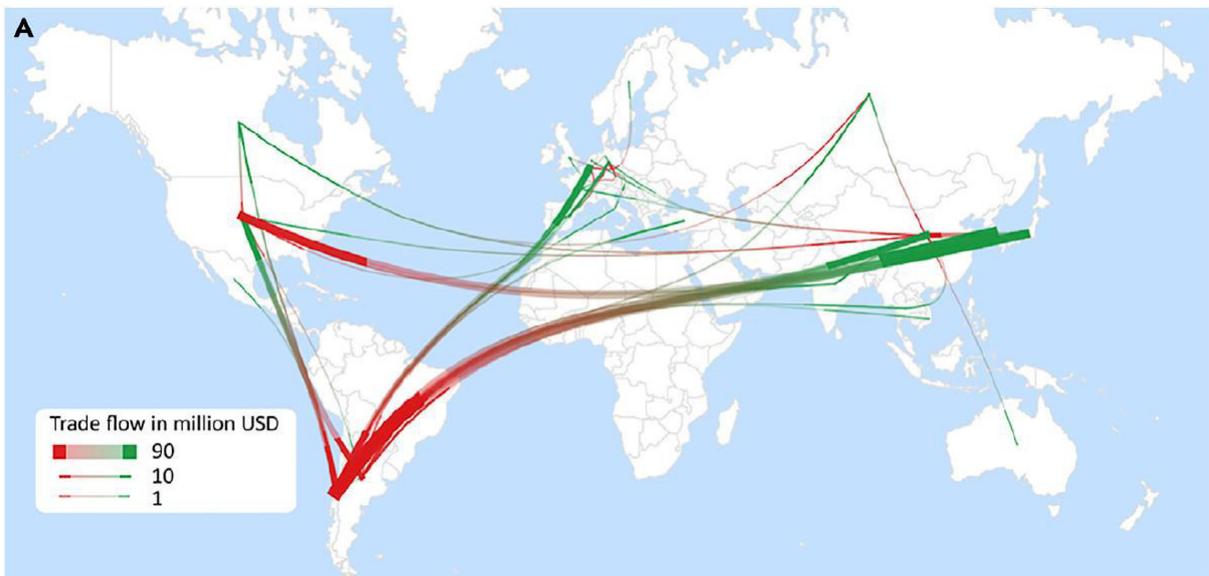


Abbildung 24: Weltweite Lithium-Handelswerte für 2015 – Rot: Export / Grün: Import [17, p. 235].

Kobalt

Nur etwa 6 % des weltweit produzierten Kobalt stammen aus einer primären Produktion. Der Rest fällt hauptsächlich als Beiprodukt bei der Nickel- und Kupferproduktion an. Bei der Nickelproduktion werden entweder nickelhaltige Lateriterze ausgelaugt (0,05 % - 0,15 % Kobalt) oder Nickelsulfid-Erze geschmolzen (0,05 % - 0,10 % Kobalt). Im Vergleich zu dem gewonnenen Kobalt kann dabei etwa das Zehnfache an Nickel extrahiert werden. Die Produktion von Kobalt als Beiprodukt von Nickel ist nicht geologisch konzentriert, was einen möglichen Versorgungsengpass aus dieser Produktion eher aufgrund einer sinkenden Nickel-Nachfrage wahrscheinlich macht. Die Kobaltproduktion als Beiprodukt des Kupferbergbaus findet beinahe ausschließlich in der Demokratischen Republik Kongo (DRC) statt. Die dort vorkommenden Kobalt-Kupfer-Erze weisen mit etwa 0,3 % Kobalt eine sehr hohe Konzentration auf. Während auf die DRC nur etwa 5 % der weltweiten Kupferproduktion entfallen, zeigt sie sich für mehr als 50 % der globalen Kobaltproduktion verantwortlich. Anders Leonhard Moser, BSc

als bei Nickel ist es somit unwahrscheinlich, dass die Verfügbarkeit von Kobalt durch eine etwaige Verringerung der weltweiten Kupferproduktion beschränkt wird. Mögliche Versorgungsschwierigkeiten werden eher hinsichtlich politischer Instabilität in der entsprechenden Region vermutet. So kam es bereits in den 1970er Jahren zu starken Preisschwankungen für Kobalt, als aufgrund von politischen Unruhen in der DRC der Koballexport kurzzeitig ausgesetzt wurde. Nicht nur der Kobaltabbau, sondern auch die Raffination ist geografisch konzentriert. So wurde 2015, wie in Abbildung 25 dargestellt, beinahe 40 % des globalen Kobalt-Handelswerts zwischen der DRC und China gehandelt, wobei in China 80 % davon für die Batterieproduktion verwendet wurde. Olivetti und Kollegen (2017) gehen davon aus, dass Kobalt das größte Risiko für potenzielle Materialengpässe für die LIB-Produktion der näheren Zukunft birgt [17, pp. 235-236].

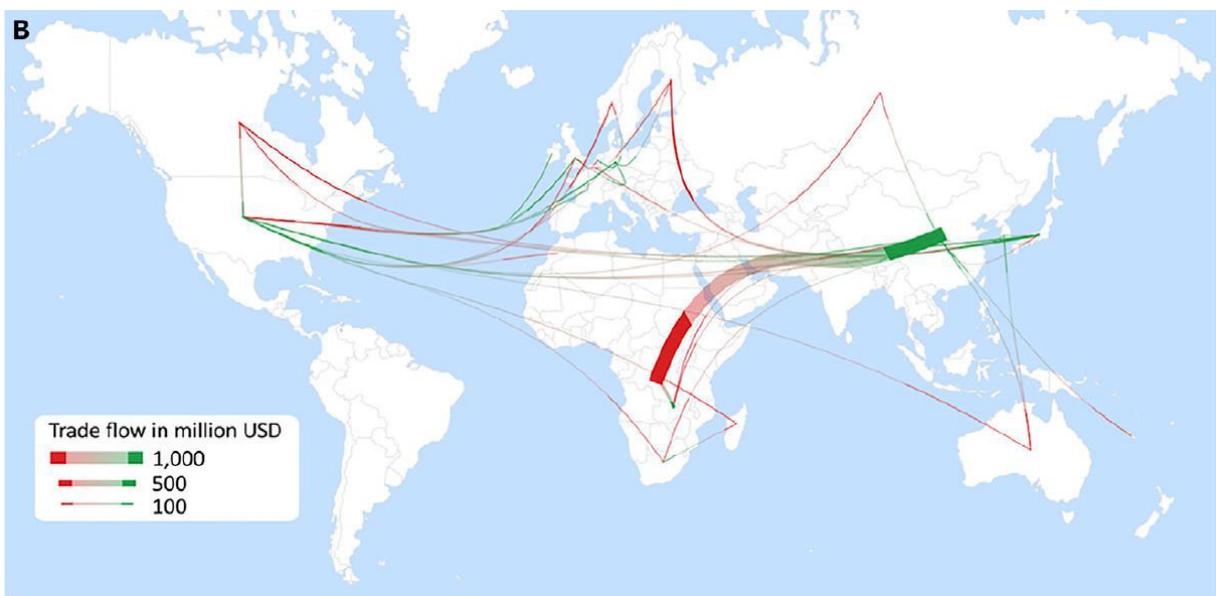


Abbildung 25: Weltweite Kobalt-Handelswerte für 2015 – Rot: Export / Grün: Import [17, p. 235].

3 Energieverbrauch und THG-Emissionen von BEV

3.1 Einführung

Um die Frage der Umweltfreundlichkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu beantworten, ist es von größter Bedeutung zuerst die Rahmenbedingungen festzulegen. Die in dieser Arbeit analysierten Studien weisen mehr oder weniger große Unterschiede in ihren Ergebnissen auf. Dies liegt neben unterschiedlichen Annahmen auch an unterschiedlichen Methoden für die Ermittlung der Umweltauswirkungen. Gerade im öffentlichen Diskurs werden oft die Ergebnisse unterschiedlicher Methoden miteinander verglichen. Dieses Kapitel soll eine Übersicht über die methodenübergreifenden Unterschiede, sowie auch die Bandbreite der Unterschiede verschiedener Studien, selber Methodik, darstellen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur der Energieverbrauch sowie die damit verbundenen Treibhausgasemissionen betrachtet. Andere negative Umwelteinflüsse wie zum Beispiel toxische Belastungen werden zwar gegebenenfalls angemerkt, jedoch nicht weiter behandelt.

Um den Energieverbrauch und die THG-Emissionen von Fahrzeugen zu ermitteln bzw. diese mit anderen Vergleichen zu können, stehen genormte Fahrzyklen zur Verfügung. Im weiteren werden die wichtigsten Fahrzyklen kurz erklärt, deren Vor- und Nachteile erläutert, sowie auf etwaige Ungleichheiten für EVs bzw. ICEVs eingegangen.

NEFZ oder NEDC

Der Neue europäische Fahrzyklus (NEFZ) besteht aus vier Stadtzyklen und einem außerstädtischen Anteil. Der Fahrzyklus steht jedoch seit Jahren in der Kritik, da sich die am Prüfstand gemessenen Werte teils sehr weit vom tatsächlichen Verbrauch unterscheiden. Betrachtet man das in Abbildung 26 dargestellte Fahrprofil, so fällt auf, dass die Höchstgeschwindigkeit bei nur 120 km/h liegt, obwohl ein Großteil des PKW-Verkehrs auf Autobahnen schneller fährt. Auch wird diese hohe Geschwindigkeit im NEFZ nur sehr kurz erreicht. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass die Beschleunigungsphasen von 0 auf 50 km/h mit 26 s als unrealistisch lange angesehen werden. Dadurch wird der überdurchschnittliche Verbrauch, welcher bei größerer Beschleunigung auftritt, nicht berücksichtigt. Insgesamt dauert der NEFZ 20 Minuten und ist 11 km lang, wobei die durchschnittliche Geschwindigkeit 34 km/h beträgt [49, 50, pp. 9-13].

Der NEFZ bietet Vor- und Nachteile für EVs. Auf der einen Seite kann der NEFZ-Test mit abgeschalteten Hilfseinheiten durchgeführt werden, wodurch der Test keine parasitären Lasten erfasst, welche den Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen erhöhen könnten. Auf der anderen Seite sind EVs jedoch viel effizienter im Stop-and-Go Verkehr, was im NEFZ nicht im vollen Umfang berücksichtigt wird [51, p. 6].

Für die Ermittlung der Verbrauchs- und Emissionswerte, welche bei PHEV anfallen, wird der Zyklus mit jeweils voller bzw. leerer Batterie durchgeführt und mit der nachfolgenden Formel,

wie in ECE R101 definiert, rechnerisch bestimmt. Dies führt bei entsprechend großer Batterie bzw. einer hohen elektrischen Reichweite zu geschönten Werten. C entspricht dabei dem Gesamtverbrauch in Litern pro 100 km, C_1 dem Kraftstoffverbrauch bei vollgeladener Batterie, C_2 dem Kraftstoffverbrauch bei leerer Batterie, D_e der rein elektrischen Reichweite und D_{av} einer Entfernung von 25 km. Der Wert für D_{av} entspricht dabei einem angenommenen Wert für die Distanz zwischen zwei Batterieladungen [52, p. 70].

$$C = \frac{D_e \cdot C_1 + D_{av} \cdot C_2}{D_e + D_{av}}$$

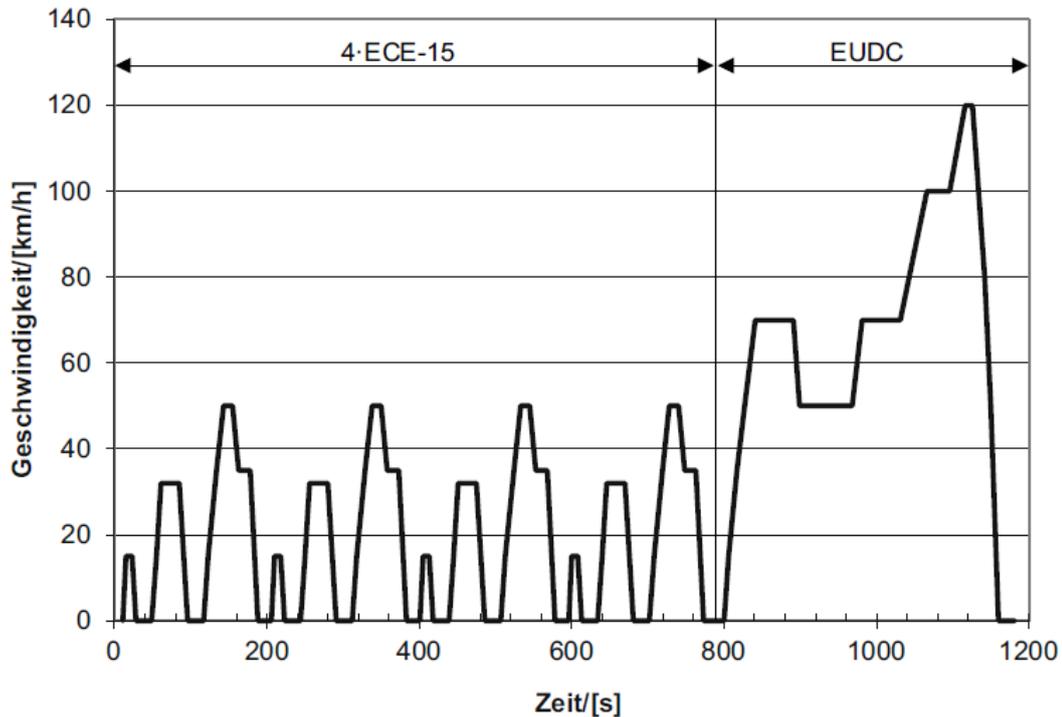


Abbildung 26: Fahrprofil des PKW-Testzyklus NEFZ, bestehend aus vier Stadtzyklen und einem außerstädtischen Anteil [50, p. 11].

WLTC

Der in Abbildung 27 dargestellte Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Cycle (WLTC) inklusive neuer Testprozeduren (WLTP), welcher von den vereinten Nationen entwickelt wurde, hat seit September 2017 den veralteten NEFZ abgelöst. Anders als der Name vermuten würde, wird der Test jedoch nicht weltweit eingeführt. In den USA ist beispielsweise seit Jahren ein Fahrzyklus etabliert, welcher den dortigen Verkehr realitätsnah abbildet. Im Vergleich zu seinem Vorgänger beruht dieser Test auf einer Vielzahl echter Fahrdaten. Insgesamt drei Gewichts- und Leistungsklassen unterscheiden die Fahrzeuge dabei für die Verbrauchs- und Emissionsermittlung. Die höchste Stufe, welche für Fahrzeuge über 35 Watt pro Kilogramm zutrifft, wird dabei noch in zwei Geschwindigkeitsklassen (über bzw. unter 120 km/h) eingeteilt. In Europa übliche Fahrzeuge fallen fast ausschließlich in diese Klasse. Insgesamt wird beim WLTC in vier Phasen gemessen: bis 60, bis 80, bis 100 bzw. über 130 km/h, wobei die Messung mit 30 min (gilt für Klasse 3) genau 10 min länger dauert

als beim NEFZ. Dabei werden insgesamt 23,25 km zurückgelegt. Zusätzlich kann beim WLTP nun deutlich früher in höhere Gänge gewechselt werden, was zuvor bei manuellen Getrieben in Abhängigkeit der Geschwindigkeit vorgegeben war. Somit verringert sich ein potenziell schlechteres Abschneiden von sportlich abgestimmten Handschaltgetrieben. Anders als beim NEFZ, ist beim WLTP festgelegt, dass wichtige Verbraucher nicht mehr abgeklemmt werden dürfen bzw. die Batterie zu Testbeginn zu 80 % geladen ist. Hinzu kommt, dass zusätzlich zu den bereits beim NEFZ festgelegten 100 kg Zuladung hier noch im Sinne einer realistischeren Zuladung nachgebessert wurde. Wie beim WLTP mit Plugin-Hybrid-Fahrzeugen verfahren wird ist noch nicht vollständig geklärt. Die umstrittene Formel in ECE R101 soll jedoch nach wie vor gültig bleiben [49, 50, p. 13].

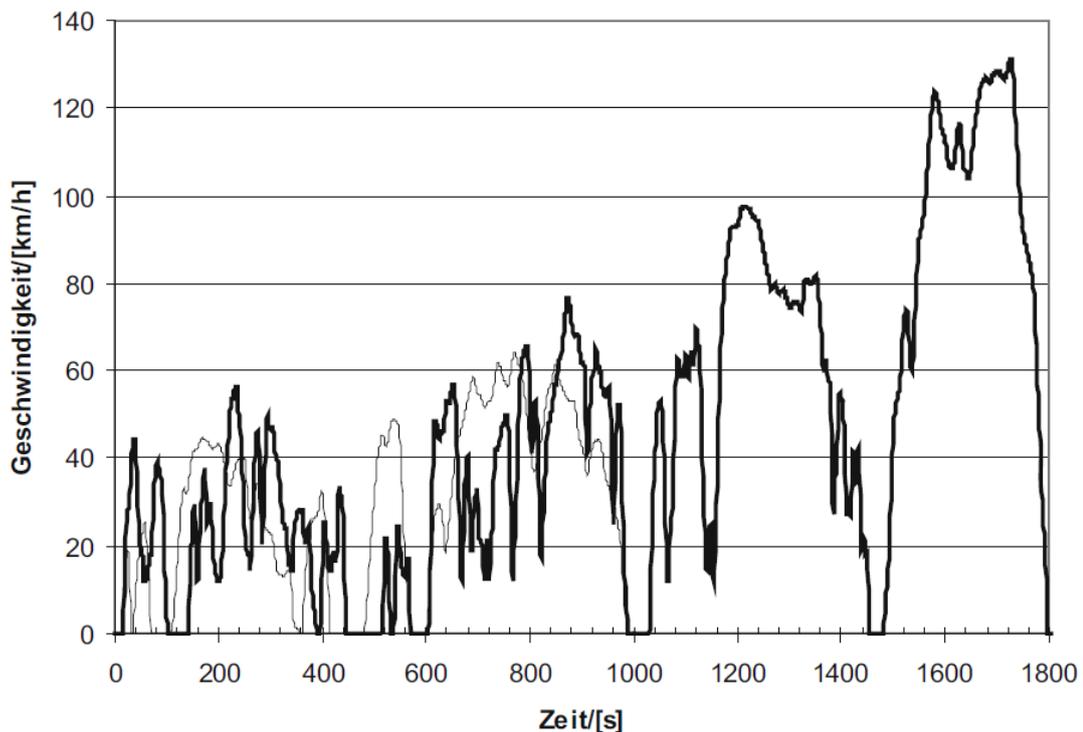


Abbildung 27: Fahrprofil des PKW-Testzyklus WLTC, bestehend aus vier Stadtzyklen und einem außerstädtischen Anteil [50, p. 14].

3.2 Allgemeiner Leistungsbedarf von Fahrzeugen

Unabhängig vom Antriebssystem muss ein Fahrzeug entsprechend den Gegebenheiten verschiedene Widerstände überwinden um sich mit konstanter Geschwindigkeit fortzubewegen.

Bei steigungsloser Strecke ohne Windwiderstand ergibt sich die für das Fahrzeug benötigte Leistung im Wesentlichen aus Rollwiderstand, Luftwiderstand und von der Geschwindigkeit. Wird zusätzlich eine Steigung angenommen muss hierbei noch der Steigungswiderstand berücksichtigt werden, welcher von der Fahrzeugmasse und dem Steigungswinkel abhängig ist.

Der Rollwiderstand F_R ist dabei abhängig vom Rollwiderstandsbeiwert f_R (0,005 bis 0,015 für Asphalt), dem Gewicht m_f des Fahrzeuges sowie der Erdbeschleunigung g .

$$F_R = f_R \cdot m_f \cdot g$$

Der Luftwiderstand F_L ergibt sich aus dem Strömungswiderstandskoeffizienten c_w , der Querschnittsfläche A des Fahrzeuges, der Dichte der Luft ρ_L und der Geschwindigkeit v .

$$F_L = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v^2$$

Insgesamt ergibt sich aus diesen beiden Widerständen sowie der Geschwindigkeit der Leistungsbedarf eines Fahrzeuges bei steigungsloser Strecke ohne Windwiderstand.

$$P_W = (F_R + F_L) \cdot v$$

Ist beispielsweise ein 1.200 kg schwerer PKW mit einer Querschnittsfläche von 2 m² auf gerader, steigungsloser Strecke ohne Wind, bei Luftdruck und Temperatur entsprechend Nominalwerten mit 100 km/h unterwegs, so ergibt sich unter Annahme Rollwiderstandsbeiwerts von 0,01 bzw. einer aerodynamischen Gütezahl von 0,3 eine benötigte Antriebsleistung von 11,57 kW.

$$\begin{aligned} P_W &= \left(f_R \cdot m_f \cdot g + c_w \cdot A \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v^2 \right) \cdot v \\ &= \left(0,01 \cdot 1200 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 0,3 \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot \frac{1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot \left(27,78 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \right) \cdot 27,78 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ &= 11,57 \text{ kW} \end{aligned}$$

Da bei höheren Geschwindigkeiten vor allem der Luftwiderstand für den Leistungsbedarf ausschlaggebend ist, kann hier näherungsweise von einem Anstieg in Abhängigkeit der dritten Potenz der Geschwindigkeit ausgegangen werden.

3.3 TTW – Tank to Wheel

Eine Tank-to-Wheel-Analyse (TTW) beschreibt den Energieverbrauch, welcher für die Fortbewegung eines bestimmten Fahrzeuges benötigt wird. Es wird hierbei also die Wirkungsgradkette vom zugeführten Energieträger (flüssiger Kraftstoff, elektrische Energie) bis zur Antriebsenergie betrachtet.

Der TTW Report des JEC¹ [53] vergleicht hierbei verschiedene Antriebstypen miteinander. Im Rahmen dieser Arbeit werden hieraus nur die Ergebnisse für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sowie rein elektrisch betriebene Fahrzeuge betrachtet.

¹ Eine Forschungskoooperation der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Union (JRC), dem Europäischen Rat für Kfz-Forschung und -Entwicklung (EUCAR) und dem Zusammenschluss der europäischen Mineralölindustrie (CONCAWE).

Rahmenbedingungen

Für die Ermittlung des Energieverbrauchs sowie der anfallenden Treibhausgasemissionen wird im TTW Report auf den NEFZ zurückgegriffen. Dieser definiert wie zuvor beschrieben Rahmenbedingungen unter welchen der Verbrauch und die Emissionen gemessen werden. Durch den definierten Testverlauf ist es möglich die Resultate von unterschiedlichen Fahrzeugen zu vergleichen. Im TTW Report werden die Fahrzyklen nicht auf reale Fahrzeuge angewandt, sondern mithilfe von AVL CRUISE, einem Simulationswerkzeug für die Analyse und Optimierung eines industriellen Fahrzeugantriebsstrangs, für die jeweiligen Fahrzeugmodelle simuliert. Dazu wurde ein Referenz-Mittelklasseauto (auch C-Segment laut den Fahrzeugsegmenten der Europäischen Union) für das Jahr 2010 bzw. 2020+ definiert um einen besseren Vergleich der verschiedenen Antriebe zu garantieren. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass dieses Fahrzeug nicht repräsentativ für die europäische Fahrzeugflotte ist [53, p. 10].

Das Referenzmodell für 2010 verfügt dabei über einen 1,4L Motor mit Direkteinspritzung (Direct Injection Spark Ignition – DISI), einem manuellen 6-Gang Getriebe, einem Vorderadantrieb und hat bei einem Querschnitt von 2,2 m² ein Gewicht von 1310 kg. Für das verbesserte Referenzmodell für 2020+ wurde das Gewicht auf 1.200 kg verringert, sowie die Koeffizienten für Luft- und Rollwiderstand verringert. Insgesamt wurden alle Fahrzeugtypen für 2010 auf eine Gesamtgewicht von 1.900 kg definiert, da davon ausgegangen wurde, dass alternative Antriebstypen auf bestehenden Fahrzeugen aufbauen würden. Der Gewichtsunterschied wurde durch die zusätzliche Nutzlast ausgeglichen. Für die 2020+ Modelle wurde jeweils eine eigene Konstruktion bzw. die selbe Nutzlast angenommen, was zu unterschiedlichen Gesamtgewichten führt. Um den Vergleich der untersuchten Fahrzeuge fair zu halten, wurden minimale Leistungsanforderungen für beispielsweise Beschleunigung oder Reichweite an die Fahrzeuge gestellt [53, pp. 12-14].

Es ist jedoch anzumerken, dass sich die minimalen Reichweiten von ICEVs (500 km) und BEVs (120 km für 2010 bzw. 200 km für 2020+) deutlich unterscheiden. Würden die Fahrzeuge auf die gleiche Reichweite ausgelegt, würde die benötigte Energie für die Fortbewegung der BEVs aufgrund des zusätzlichen Gewichts der größeren Batterie entsprechend zunehmen.

Annahmen für BEV

Für die Batterie der BEV wird eine LIB mit einer Energiedichte von 90 Wh/kg (2010) bzw. 120 Wh/kg (2020+) angenommen. Die Ladeverluste wurden dabei für eine Ladeleistung von etwa 3 kW mit 20 % (2010) bzw. 15 % (2020+) festgelegt. Als Antrieb dient ein permanentmagneterregter Synchronmotor mit einer Leistungsdichte von 1.200 W/kg (2010) bzw. 1.350 W/kg (2020+). Für den Testzyklus wurde die Bremskraftrückgewinnung bei BEVs mitberücksichtigt. Im Vergleich zum Referenzmodell ändert sich das Leergewicht durch die BEV-Komponenten nur geringfügig. Durch das Fehlen von Verbrennungsmotor und Tank werden 241 kg gespart sowie durch E-Motor, Batterie und Verkabelung 296 kg hinzugefügt [53, p. 16].

Ergebnisse

Tabelle 10 zeigt Auszüge der Ergebnisse des TTW Reports für ein Benzin-, ein Diesel- sowie ein batteriebetriebenes Fahrzeug für 2010. Es wird noch einmal drauf hingewiesen, dass durch die Ermittlung mit dem NEFZ zwar vergleichbare Ergebnisse entstehen, diese jedoch im alltäglichen Betrieb nicht realistisch sind. Durch das Fehlen des Verbrennungsmotors weist das BEV im Betrieb keine THG-Emissionen auf. Vergleicht man den Treibstoff- bzw. Energieverbrauch, so lässt sich ein deutlich besserer Wirkungsgrad beim BEV erkennen. Der Verbrauch elektrischer Energie (inkl. Ladeverluste) liegt bei etwa 25 % des Energieverbrauchs bei Benzin-, bzw. 30% bei Dieselantrieb.

Typ	Leergewicht	Treibstofftank Kapazität	Batteriekapazität	Treibstoffverbrauch			El. -Energieverbrauch		THG-Emissionen			
							Ohne Ladeverlust	Inkl. Ladeverlust	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Gesamt
	kg	l	kWh	MJ/100km	l/100km	kg/100km	kWh/100km	kWh/100km	g CO ₂ /km	g CO ₂ eq/km	g CO ₂ eq/km	g CO ₂ eq/km
DISI Benzin	1.310	55	-	203,8	6,33	4,72	-	-	149,6	0,3	0,4	150,3
DICI Diesel	1.370	55	-	162,5	4,53	3,77	-	-	119	0,1	1,1	120,2
BEV	1.365	-	17,8	-	-	-	11,38 - 40,97 MJ/100km	14,49 - 52,16 MJ/100km	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 10: Auszug aus den Simulationsergebnissen des TTW Report für 2010 [53, pp. 36,38].

Tabelle 11 zeigt Auszüge der Ergebnisse des TTW Reports für ein Benzin-, ein Diesel- sowie ein batteriebetriebenes Fahrzeug für 2020+. Das Leergewicht aller Fahrzeugtypen ist laut der Prognose des JEC bis dahin deutlich gesunken. Auch Energieverbrauch sowie die THG-Emissionen werden durchschnittlich um etwa 30 % verringert prognostiziert.

Typ	Leergewicht	Treibstofftank Kapazität	Batteriekapazität	Treibstoffverbrauch			El. -Energieverbrauch		THG-Emissionen			
							Ohne Ladeverlust	Inkl. Ladeverlust	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Gesamt
	kg	l	kWh	MJ/100km	l/100km	kg/100km	kWh/100km	kWh/100km	g CO ₂ /km	g CO ₂ eq/km	g CO ₂ eq/km	g CO ₂ eq/km
DISI Benzin	1.200	35	-	142,4	4,43	3,30	-	-	104,5	0,3	0,5	105,3
DICI Diesel	1.260	35	-	118,5	3,3	2,75	-	-	86,8	0,2	1,2	88,2
BEV	1.230	-	22,1	-	-	-	8,89 - 32,00 MJ/100km	10,59 - 38,12 MJ/100km	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 11: Auszug aus den Simulationsergebnissen des TTW Report für 2020+ [53, pp. 46,49].

3.4 WTT – Well to Tank

Wird nur der Betrieb von Fahrzeugen betrachtet, so hat es wie zuvor angemerkt den Anschein als würde ein BEV im Vergleich zu Autos mit Verbrennungsmotoren keine THG emittieren. Dies lässt jedoch unberücksichtigt, dass die verwendete elektrische Energie, sofern diese nicht aus rein erneuerbaren Quellen stammt, mit teils erheblichen THG-Emissionen bei der Produktion verbunden ist. Auch die Energie, welche für die Bereitstellung der fossilen Kraftstoffe benötigt wird, wird dabei nicht betrachtet.

Eine „Well to Tank“ Analyse beschreibt die Wirkungsgradkette für die Bereitstellung der Energieträger von Fahrzeugen. Well to Tank, was so viel bedeutet wie „Vom Bohrloch bis zum Tank“, entspricht im Falle eines Elektroautos sämtlichen Schritten, welche für die Bereitstellung der für den Betrieb des Fahrzeuges benötigten elektrischen Energie notwendig sind.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Well-to-Tank Report (WTT) [54] des JEC für Elektroautos sowie dazu der Vergleich mit herkömmlichen Autos mit Verbrennungsmotor dargestellt. Dieser geht dabei im Besonderen auf die Energieversorgung in Europa ein. Zu beachten ist, dass hier nur der Prozess der Bereitstellung betrachtet wird und somit die Energie, welche für die Errichtung der jeweiligen Infrastruktur (z.B. Raffinerien, Kraftwerke, ...) aufgewandt wurde, nicht berücksichtigt wird.

Um einen Vergleich der unterschiedlichen Pfade zu erleichtern, werden diese im WTT Report in jeweils fünf Stufen unterteilt.



Abbildung 28: Pfad für die Bereitstellung der elektrischen Energie [54, p. 13]. – eigene Darstellung

Produktion und Aufbereitung an der Quelle

In diesem Punkt werden alle Schritte, welche für die Gewinnung des Primärenergieträgers erforderlich sind, zusammengefasst. Falls der Weitertransport des Energieträgers eine Behandlung oder Aufbereitung erfordert, wird dies ebenfalls berücksichtigt.

Umwandlung an der Quelle

Wird für den Weitertransport eine Umwandlung des Energieträgers in einem aufwändigen industriellen Prozess benötigt (z.B. Gasverflüssigung), so wird dies in diesem Punkt berücksichtigt.

Transport in die EU

Dieser Punkt berücksichtigt den Transport von Energieträgern, welche außerhalb der EU gewonnen und über weite Strecken transportiert werden müssen.

Umwandlung in der EU

Umfasst sämtliche Umwandlungs- und Verarbeitungsschritte, welche in der EU stattfinden um einen spezifizierten Endenergieträger herzustellen.

Aufbereitung und Verteilung

In diesem Punkt werden alle finalen Bearbeitungsschritte für den Transport sowie der eigentliche Transport der Energieträger an die jeweiligen Entnahmestellen für die Fahrzeuge zusammengefasst.

3.4.1 Bereitstellung elektrischer Energie

Elektrische Energie kann aus vielen verschiedenen Primärenergiequellen erzeugt werden, weshalb keine generelle Aussage über den Energiebedarf oder die THG-Emissionen für die Erzeugung der elektrischen Energie für Elektrofahrzeuge getroffen werden kann.

Für die weiteren Betrachtungen werden somit drei unterschiedliche Szenarien für die Bereitstellung der elektrischen Energie gewählt.

EU-Mix

Um eine gesamteuropäische Aussage über den Energieverbrauch von Fahrten mit Elektroautos tätigen zu können, ist es notwendig den durchschnittlichen Energieaufwand für die Stromversorgung zu betrachten. Zu diesem Zweck wird der EU-Mix, also die prozentuelle Aufteilung der in Europa für die gesamte Stromversorgung verwendeten Primärenergieträger, verwendet. Der prozentuelle Anteil der einzelnen Primärenergieträger von 2009 für die im WTT Report durchgeführten Untersuchungen ist in Tabelle 12 dargestellt.

Primärenergiequelle	Prozentueller Anteil
Nuklear	33,0
Kohle, Braunkohle, Torf	31,0
Gas	20,8
Öl	3,5
Wasserkraft	4,4
Wind	1,6
Abfall	1,8
Andere Erneuerbare	3,9

Tabelle 12: Anteil der Primärenergieträger am EU-Mix [54, p. 69].

Der Energieverbrauch in den Kraftwerken wird üblicherweise über die Energieträgermenge und den Heizwert bestimmt. Für Energiequellen, für welche eine solche Berechnung nicht möglich ist (z.B Wind, Solar, Wasserkraft, Atomkraft), wird in diesem Fall ein Faktor für den Energieaufwand pro Ausgangseinheit definiert. Der WTT Report definiert diesen als 1 für erneuerbare Quellen sowie, aufgrund ihres Wirkungsgrades, 0,33 für Atomkraftwerke [54, p. 67].

Der WTT Report betrachtet hier nicht nur die Menge an Energie, welche für die Verstromung benötigt wird, sondern auch jene, welche für die zur Produktion bzw. Verfügungstellung der Energieträger benötigt worden ist. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass hier auf die Berücksichtigung von Stromimporten in die EU verzichtet wird.

Für die Werte von 2009 ergibt sich für Europa ein Energieverbrauch von 2,744 MJ pro MJ erzeugter elektrischer Energie.² Wird der Eigenenergieverbrauch der Kraftwerke

² Aufgrund des in letzten Jahren fortschreitenden Ausbaus der Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen, ist davon auszugehen, dass der heutige EU-Mix weniger Energie benötigt bzw. weniger THG emittiert.

mitberücksichtigt, steigt dieser Wert geringfügig auf 2,856 MJ. Hinzukommen 1,4 % Verluste für den Einsatz von Pumpspeicherkraftwerken sowie Übertragungsverluste im Hochspannungsnetz von ca. 1,5 %. Wird nun davon ausgegangen, dass sich der Entladepunkt für die elektrische Energie für Elektroautos in der Niederspannungsebene befindet, müssen noch die Übertragungsverluste auf der Mittel- und Niederspannungsebene mit 4 % bzw. 6 % berücksichtigt werden. Somit ergibt sich ein Gesamtenergieaufwand von 3,244 MJ pro auf der Niederspannungsebene abgegebenem MJ elektrischer Energie. Bei der Produktion werden dabei 150 g CO₂eq/MJ_e bzw. 540 g CO₂eq/kWh_e emittiert [54, pp. 69-70].³

Abbildung 29 zeigt das zusammengefasste Energieflussdiagramm für die europäische Stromproduktion von 2009.

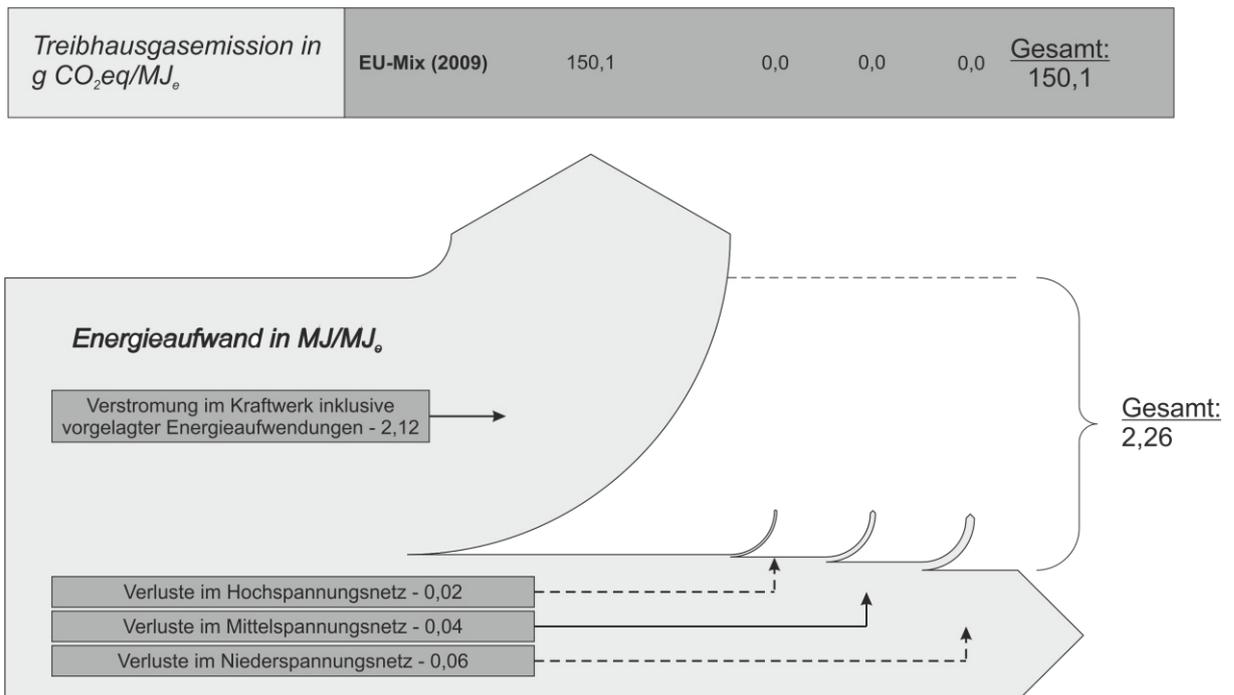


Abbildung 29: Zusammengefasste Darstellung der Energie- und Treibhausemissionszahlen europäischen Stromproduktion von 2009 [55]. – Eigene Darstellung

Strom aus erneuerbaren Quellen

Wird von erneuerbaren Quellen für die Bereitstellung der elektrischen Energie, wie Wind oder Photovoltaik, ausgegangen, so führt dies zu einer signifikanten Reduktion des benötigten Energieaufwandes. In diesem Fall führt der WTT Report lediglich die Verluste während der Übertragung in den jeweiligen Netzebenen auf. Somit ergibt sich der Energieaufwand für die Bereitstellung von elektrischer Energie aus Windkraft an der Niederspannungsebene zu

³ Hierbei soll angemerkt werden, dass sich die Daten aus dem WTT Report mit den Werten der zugehörigen Appendix 2 und 4 in manchen Zahlen minimal unterscheiden, wodurch die unterschiedlichen Zahlen zwischen den zuvor genannten Werten sowie beispielsweise Abbildung 29 und Tabelle 13 zu erklären sind.

1,12 MJ/MJ_e. Da die Herstellung der Kraftwerke unberücksichtigt bleibt, ergeben sich für die Stromproduktion aus Windkraft keine THG-Emissionen [56, p. 21].

Kohle

Der WTT Report unterscheidet zwei unterschiedliche Kohlekraftwerkstypen für die Bestimmung des Energieaufwands und der emittierten THG durch Stromerzeugung aus Kohle. Zum einen ist dies ein konventionelles Kohlekraftwerk am aktuellen Stand der Technik, und zum anderen ein Kohlekraftwerk mit vorgeschalteter Brennstoffvergasung (Integrated Gasification Combines Cycle – IGCC). Für das konventionelle Kraftwerk wird dabei ein Wirkungsgrad von 43,5 % angenommen. Dem IGCC Kraftwerk wird ein Wirkungsgrad von 48 % zugewiesen, wobei darauf hingewiesen wird, dass in der Literatur eine große Bandbreite an Daten existiert und der kombinierte Prozess die bessere Gesamteffizienz liefern kann. Hierbei unterscheidet der WTT Report zusätzlich, ob eine CO₂ Abscheidung und Speicherung (CO₂ Capture and Storage – CSS) bei dem IGCC Kraftwerk durchgeführt wird, was hinsichtlich der THG-Emissionen deutliche Vorteile mit sich bringt. Die Speicherung erfolgt dabei beispielsweise in erschöpften Gas- und Ölfeldern, Salzstollen oder salzwasserführende Grundwasserleitern [54, p. 65]. Da diese Technologie jedoch weltweit nur in wenigen Anlagen geringer Größenordnung implementiert ist, wird in dieser Arbeit auf eine weitere Betrachtung verzichtet.

Die aufgewandte Energie für die Produktion eines in der Niederspannungsebene entnommenem MJ elektrischer Energie in einem konventionellen Kohlekraftwerk gibt das JEC mit 1,81 MJ an. Dabei werden 292,4 g CO₂eq emittiert, wobei 41,2 g CO₂eq im Zuge der Bereitstellung des Kohlebrennstoffs anfallen bzw. die restlichen 251,2 g CO₂eq der Verfeuerung im Kraftwerk zugeschrieben werden. Für die IGCC Kraftwerke ergeben sich mit 1,54 MJ/MJ_e sowie 262,4 g CO₂eq etwas geringere Werte für den Energiebedarf sowie die THG-Emissionen [56, p. 21].

Zusammenfassung

Tabelle 13 zeigt die gesammelten Werte für den benötigten Energiebedarf sowie die emittierten THG bei der Bereitstellung elektrischer Energie in der Niederspannungsebene aus unterschiedlichen Quellen. Es zeigt sich, dass dabei für den EU-Mix mehr Energie benötigt wird als durch eine Stromproduktion mit einem konventionellen Kohlekraftwerk. Dies liegt auch an dem relativ hohen Anteil an Atomkraft welcher mit einem Wirkungsgrad von 33 % eingerechnet wurde. Die THG-Emissionen entsprechen mit 150,1 g CO₂eq etwa der Hälfte eines Kohlekraftwerks mit 292,4 g CO₂eq pro erzeugtem MJ elektrischer Energie bei Entnahme in der Niederspannungsebene.

Quelle	Aufgewandte Energie (MJ/MJ _e)				THG-Emissionen (g CO ₂ eq/MJ _e)			
	Gesamt	Fossil	Nuklear	Erneuerbar	Gesamt	Produktion und Aufbereitung an der Quelle	Transport	Kraftwerk
EU-mix	2,26	0,73	1,20	0,34	150,1			150,1
konventionelles Kohlekraftwerk	1,81	1,78	0,03	0,00	292,4	41,2		251,2
Atomkraftwerk	3,08	0,06	3,01	0,01	5	0,1	4,6	0,3
Windkraftanlage	0,12	0,00	0,00	0,12	0,0			0,0

Tabelle 13: Zusammengefasste Werte für Energieaufwand und THG-Emissionen unterschiedlicher Stromerzeugungspfade [56, p. 21].

3.4.2 Bereitstellung fossiler Kraftstoffe

Anders als bei der Erzeugung elektrischer Energie, ergibt sich bei der Diesel bzw. Benzinproduktion, wie in Abbildung 30 dargestellt, ein einfacher Wirkungsgradpfad.

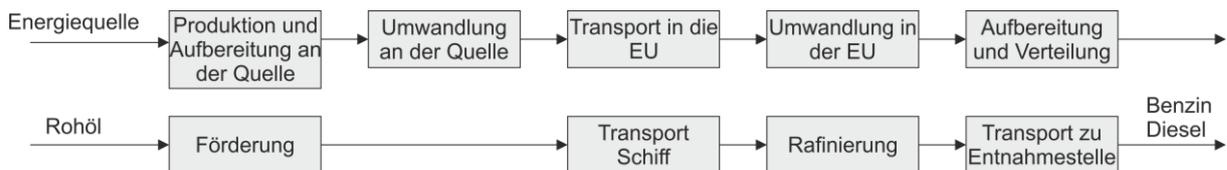


Abbildung 30: Herstellungspfad für die Treibstoffproduktion [54, p. 20]. – eigene Darstellung

Rohölförderung

Weitgehend unbetrachtet bleibt bei vielen Well-to-Tank Analysen das Abfackeln der bei der Ölförderung auftretenden Gase. Obwohl in letzter Zeit ein Anstieg jener Förderstellen zu bemerken ist, welche das Gas entweder separieren und als Flüssiggas verschiffen, oder wieder in die Speicherstätte zurückpumpen [54, p. 21], sollte dies, vor allem im Hinblick auf eine Aussage über die gesamten THG-Emissionen die das Fahren mit fossil betriebenen Fahrzeugen mit sich bringt, nicht vernachlässigt werden.

Mit Daten der IOPG⁴ für Energieaufwand und Treibhausgasemissionen in Kombination mit der durch die IEA erhobenen Daten des Jahres 2011 über das in den europäischen OECD⁵ Mitgliedsstaaten verwendeten Rohöls, ergibt sich ein Energieaufwand von 0,027 MJ/MJ sowie einer Treibhausgasemission von 2,89 g CO₂eq/MJ Rohöl. Der IOPG Report ordnet die THG-

⁴ Die internationale Verband der Öl- und Gasproduzenten (IOPG) ist verantwortlich für etwa 40 % der weltweiten Öl- und Gasproduktion [73].

⁵ Eine internationale Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung mit 35 Mitgliedern.

Emissionen zu 51 % dem Energieaufwand der Förderung, 35 % dem Abfackeln des Gases sowie 14 % der Entlüftung und flüchtigen Verlusten zu. Somit ergibt sich eine spezifische Treibhausgasemission von 1,5 g CO₂eq/MJ Rohöl für die Förderung, 1,0 g CO₂eq/MJ Rohöl für das Abfackeln des Gases sowie 0,4 g CO₂eq/MJ Rohöl für Entlüftung und flüchtige Verluste. Obwohl die IOPG Förderung nur für etwa 48 % des europäischen Rohöls verantwortlich ist, wird aufgrund mangelnder internationaler Daten im WTT Report des JEC auf die oben genannten Daten für spezifischen Treibhausgasemissionen durch Förderung sowie Entlüftung zurückgegriffen [54, pp. 21-23].

Tabelle 14 zeigt die detaillierten Werte für die einzelnen Regionen⁶, inklusive des Anteils an der europäischen Rohölversorgung. Auffällig sind hierbei vor allem die hohen spezifischen Treibhausgasemissionen für Afrika und Asien.

Rohöl nach Region in 2011		Gesamt	Afrika	Asien	Europa	FSU	ME	NA	SA
OECD EU	Mt/a	567	94	0	147	207	99	8	11
Verbrauch	%	100	17	0	26	37	18	1	2
Energiebedarf	MJ/MJ	0,027	0,032	0,041	0,027	0,026	0,019	0,073	0,040
THG-Emission	g CO ₂ eq/MJ	2,89	6,02	6,04	2,03	2,73	1,23	5,61	3,97

Tabelle 14: Geschätzte Emissionen durch die Rohölproduktion in der OECD EU für 2011 [54, p. 22].

Vergleichbare internationale Daten in Bezug auf Flaring bietet die US Klimabehörde NOAA. Die durch Satellitenbeobachtungen entstandenen und 2011 veröffentlichten Daten zeigen das Volumen des abgefackelten Gases einzelner Länder. In Kombination mit dem BP Statical Review über die Öl- und Gasproduktionszahlen sowie den Zahlen des in der OECD EU verwendeten Rohöls der Internationalen Energieagentur ergibt sich eine spezifische Treibhausgasemission zwischen 2,9 g CO₂eq/MJ Rohöl, falls sämtliches abgefackeltes Gas der Ölproduktion zugesprochen wird. Erfolgt eine gleichmäßige Aufteilung auf die Öl- und Gasproduktion, so verringert sich der Wert auf 1,8 g CO₂eq/MJ Rohöl. Der WTT Report verwendet für die weiteren Betrachtungen einen gemittelten Wert von 2,4 g CO₂eq/MJ Rohöl. Dass dieser Wert höher ist als jener, welcher durch die IOPG Daten angegeben wird (1,0 g CO₂eq/MJ Rohöl), wird dadurch erklärt, dass den hauptsächlich internationalen Konzernmitgliedern der IOPG zugetraut wird, Flaring in größerem Maße zu reduzieren als nationale Öl-Gesellschaften. Weiters wird im WTT Report davon ausgegangen, dass eine Veränderung des europäischen Rohölbedarfs vor allem Rohöl aus dem Mittleren Osten betreffen würde. Da diese Länder einen im Vergleich eher geringen Energieaufwand für die Förderung von Rohöl aufweisen, werden die für den WTT Report herangezogenen Werte als eher konservativ betrachtet [54, pp. 23-26].

Tabelle 15 zeigt die im WTT Report verwendeten Werte der spezifischen Treibhausgasemissionen sowie der benötigten spezifischen Energie bei der Rohölproduktion für die OECD EU.

⁶ Abkürzungen: Ehemalige Sowjetunion (FSU), Mittlerer Osten (ME), Nord-Amerika (NA), Süd-Amerika (SA).

Quelle	THG-Emissionen	Energie
	g CO ₂ eq/MJ Rohöl	MJ/MJ Rohöl
Energiebedarf bei der Produktion	1,5	0,027
Flaring	2,4	0,037
Entlüftung und diffuse Emissionen	0,4	0,001
Gesamt	4,3	0,065

Tabelle 15: THG-Emissionen und Energiebedarf bei der Rohölproduktion [54, p. 26].

Rohöltransport in die EU

Rohöl wird neben Öl-Pipelines hauptsächlich über den Seeweg nach Europa transportiert. Da eine Veränderung (und im Sinne dieser Arbeit vor allem interessant, eine Verringerung) des Rohölbedarfs, wie bereits zuvor erwähnt vor allem den Nahen Osten betreffen würde, geht der WTT Report von einem mit Schweröl betriebenen Öltanker für den Transport aus. Somit wird für den Transport in weiterer Folge ein spezifische Energie von 0,01 MJ/MJ sowie eine spezifische Treibhausgasemission von 0,8 g CO₂eq/MJ angenommen [54, p. 27].

Erdölraffination

Der Großteil der in Europa verwendeten Treibstoffe wird in europäischen Raffinerien hergestellt, daher geht der WTT Report für die weiteren Betrachtungen von einer solchen europäischen Produktion aus. Die Energie die eine europäische Raffinerie für die Produktion benötigt, ist gut dokumentiert und beträgt etwa 6 % bis 7 % der gesamten aufgenommenen Energie. Das Problem einzelnen Kraftstoffen einen spezifischen Energieverbrauch sowie eine spezifische Treibhausgasemission während der Produktion zuzuschreiben entsteht vor allem dadurch, dass die Herstellung verschiedenster rohölbasierter Produkte gleichzeitig und in Kombination von zusammenhängenden Prozessen passiert. Für den WTT Report wird in weiterer Folge ein regionales Raffineriemodell von Concawe⁷ verwendet. Da im WTT Report von einem Zeitrahmen bis 2020 sowie von einer Substitution konventioneller durch alternative Kraftstoffe in der Höhe von 5 % bis 15 % ausgegangen wird, stellt sich die Frage wie viel Energie sowie Treibhausgasemissionen durch ein nicht produzieren dieser Kraftstoffmenge eingespart werden könnte. Innerhalb dieser Größenordnung wird angenommen, dass sich die für die Produktion benötigte Energie sowie die Treibhausgasemissionen proportional zum produzierten Volumen verhält. Für die Ermittlung der benötigten Daten, wird im WTT Report eine Marginalanalyse mit Hilfe des Concawe EU Raffineriemodells für europäische Raffinerien in 2010 durchgeführt. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Szenarien definiert. Das Basis Szenario wurde so eingestellt, dass die Gesamtnachfrage nach Diesel bzw. Benzin von 2010 gedeckt wird. Beim alternativen Szenario wiederum wurde der Bedarf nach einem bestimmten Kraftstoff minimal verringert bzw. erhöht. Sämtliche zusätzlichen Parameter, wie z.B. das Produktionsvolumen anderer Kraftstoffe, wurden hingegen nicht verändert. Die Unterschiede der Simulationen der beiden Szenarien im Hinblick auf den Energiebedarf der Raffinerie sowie

⁷ Zusammenschluss der europäischen Mineralölindustrie.
Leonhard Moser, BSc

die Treibhausgasemission wurden dem marginal veränderten Kraftstoff zugeschrieben (siehe Abbildung 31) [54, pp. 27-29].



Abbildung 31: Auswirkung einer marginalen Reduktion der Benzin-Produktion [54]. – eigene Darstellung

Basierend auf den Ergebnissen der Simulation ergibt sich ein Energiebedarf von 0,08 MJ/MJ für Diesel bzw. 0,10 MJ/MJ für Benzin sowie eine spezifische Treibhausgasemission von 7,0 g CO₂eq/MJ für Diesel bzw. 8,6 g CO₂eq/MJ für Benzin [54, p. 29].

Ein Concawe Report von 2017 weist darauf hin, dass diese Zahlen zwar realistisch erscheinen, das Modell jedoch erhebliche Nachteile mit sich bringt. So funktioniert dieser Ansatz nur für die Hauptprodukte einer Raffinerie. Weiters ergeben die Summe aller marginalen Aufwendungen nicht exakt die Gesamtemission der in der Simulation betrachteten Raffinerien. Im Concawe Report werden die Energie- sowie Emissionseinsparungen durch eine marginale Änderung der Treibstoffproduktion nicht nur dem Kraftstoff selbst, sondern auch der somit veränderten Raffinerie-Konfiguration bzw. der Produktionskapazität zugewiesen. Diese Neuzuteilung sorgt für etwa 10 % Abweichung im Vergleich zum WTT Report. Eine weitere Abweichung in der Größenordnung von 10 % ist auf Änderungen im Basisszenario sowie Änderungen im Raffinerie-Modell zurückzuführen. Somit sind die Werte (siehe Tabelle 16) für Energie und Emission des Concawe Report um etwa 20 % geringer als jene des WTT Report [57, pp. IV, 12].

Treibstoff	JEC – WTT Report	Concawe Report
	g CO ₂ eq/MJ	g CO ₂ eq/MJ
Benzin	7,0	5,5
Diesel	8,6	7,2

Tabelle 16: Emissionen durch die Treibstoffraffination [57, p. 12].

Kraftstofftransport zu den Tankstellen

Die aufbereiteten Kraftstoffe werden in der EU entweder mit Tanklastwagen zu den jeweiligen Tankstellen, bzw. über Pipelines, Zug oder Tankschiffe zu Kraftstoffdepots transportiert. Für diesen Transport rechnet der WTT Report im europäischen Schnitt mit einem Energieaufwand

von 20 kJ/MJ sowie einer Treibhausgasemission von etwas über 1 g CO₂eq/MJ transportiertem Kraftstoff [54, p. 29].

Zusammenfassung

Abbildung 32 zeigt das zusammengefasste Energieflussdiagramm für die Produktion von erdölbasierten Kraftstoffen, wobei im Zuge dieser Arbeit nur Diesel und Benzin betrachtet wurden. Insgesamt ermittelt der WTT Report einen Energieaufwand von 0,20 MJ/MJ Kraftstoff für Diesel bzw. 0,18 MJ/MJ für Benzin. Die kumulierten THG-Emissionen betragen dabei 15,4 g CO₂eq/MJ Kraftstoff für Diesel bzw. 13,8 g CO₂eq/MJ für Benzin.³

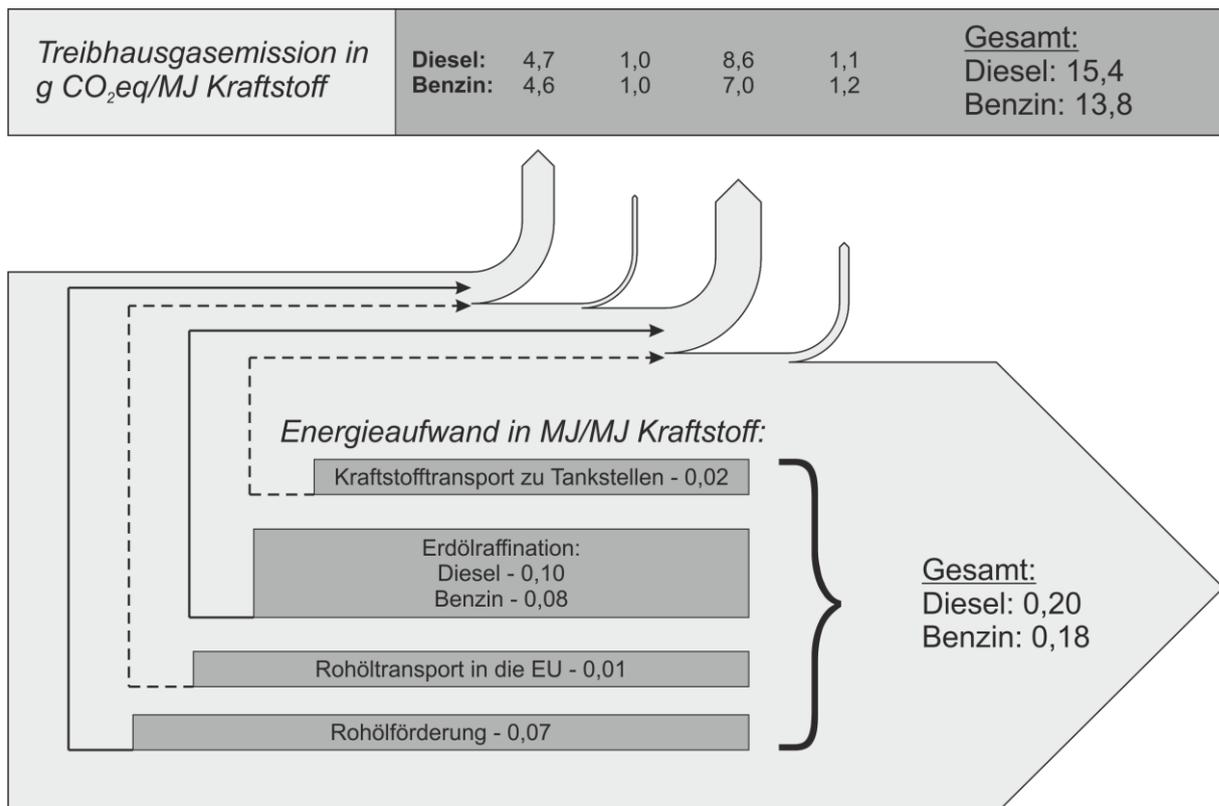


Abbildung 32: Zusammengefasste Darstellung der Energie- und Treibhausgasemissionszahlen der erdölbasierten Kraftstoffherzeugung [56]. – Eigene Darstellung

3.4.3 Vergleich

Aufgrund der verschiedenen Stromproduktionspfade kann keine generelle Aussage darüber getroffen werden, ob der Energieaufwand sowie die THG-Emissionen bei der Bereitstellung von einem MJ elektrischer Energie oder bei der Bereitstellung von einem MJ fossilem Kraftstoff größer ist. Vergleicht man jedoch durchschnittliche Werte der europäischen Treibstoffproduktion mit dem EU-Mix, so zeigt sich, dass im Zuge der Stromproduktion in etwa das 10-fache an Energie benötigt, sowie etwa das 10-fache an THG emittiert wird.

3.5 WTW – Well to Wheel

Kombiniert man die benötigte Energie sowie die THG-Emissionen beim Betrieb des Fahrzeuges mit der Energie und den Emissionen welche für die für die Herstellung der Treibstoffe bzw. der elektrischen Energie benötigt werden bzw. anfallen, so ergibt dies den Gesamtenergieverbrauch für die Fortbewegung eines Fahrzeuges. Diese Form der Betrachtung wird Well to Wheel Analyse genannt. Im Folgenden werden die Ergebnisse des WTW Report des JEC [58] dargestellt, welcher die Ergebnisse der zuvor beschriebenen TTW- und WTT-Analysen kombiniert.

Ergebnisse

Tabelle 17 und Tabelle 18 zeigen die Ergebnisse der JEC-WTW-Analyse für die Fahrzeugmodelle von 2010 bzw. 2020+. Es zeigt sich, dass durch die Berücksichtigung der Bereitstellung der Treibstoffe bzw. der elektrischen Energie der Vorsprung von BEV hinsichtlich eines geringeren Energiebedarfs sowie geringerer THG-Emissionen im Vergleich zu Autos mit Verbrennungsmotor abnimmt.

Hierbei ist anzumerken, dass für die Ermittlung der für die Stromproduktion verwendeten Energie sowie emittierten Treibhausgase die Daten von 2009 in der EU27 zugrunde liegen. Dabei wurde der durchschnittliche EU-Mix unter der Annahme einer Fahrzeugladung auf der Niederspannungsebene verwendet. Aufgrund der schwer anzustellenden Prognosen für den zukünftigen EU-Mix bzw. dadurch, dass neue Technologien im langlebigen Elektrizitätssektor nur langsam implementiert werden, geht der WTT Report davon aus, dass sich der EU-Mix bis 2020 nur unwesentlich ändert und verwendet daher auch für die 2020+ Projektion dieselben Werte.

So wird für die Produktion der elektrischen Energie für eine 100 km Fahrt des BEV-Referenzfahrzeuges (52 MJ bzw. 14,5 kWh) eine Gesamtenergie von 118 MJ benötigt, während es für die Treibstoffproduktion des Benzin- und Dieselfahrzeuges nur 38 MJ bzw. 33 MJ sind. Auch die THG-Emissionen steigen Verglichen mit der TTW Analyse um 78 g CO₂eq/km deutlich mehr an als bei den ICE-Fahrzeugen mit 28 g CO₂eq/km (Benzin) bzw. 25 g CO₂eq/km (Diesel).

Würde man hier im Gegensatz zum EU-Mix eine länderspezifische Stromerzeugung betrachten können die Emissionswerte dabei abhängig vom Erzeugungsland sehr stark variieren. So würde eine Fahrt in Schweden nur mit 3 g CO₂eq/km belastet, während in Polen etwa 170 g CO₂eq/km durch die entsprechende Stromproduktion emittiert würden [59].

Typ	TTW Energieinhalt Treibstoff	TTW Energie für Treibstoffproduktion	TTW Elektrische Energie	WTT Energie für die Stromproduktion	WTW Alle Energiequellen		THG- Emissionen g CO ₂ eq / km		
					Total	Fossil	TTW	WTT	WTW
	MJ/100km	MJ/100km	MJ _e /100km	MJ/100km	MJ/100km	MJ/100km			
DISI Benzin	204	38	0	0	241	240	150	28	178
DICI Diesel	163	33	0	0	196	195	120	25	145
BEV EU-Mix	0	0	52	118	170	38	0	78	78
BEV Kohle	0	0	52	94	146	93	0	153	153
BEV Wind	0	0	52	6	0	0	0	0	0

Tabelle 17: Auszug aus den zusammengefassten Ergebnissen des WTW Report für 2010 [58, pp. 5,35,36].

Ein ähnliches Bild zeigt sich für die prognostizierten Fahrzeugmodelle für 2020+. Hierbei verringert sich der Energiebedarf sowie die THG-Emissionen für alle Fahrzeugtypen relativ gleichmäßig um etwa 30 %.

Typ	TTW Energieinhalt Treibstoff	TTW Energie für Treibstoffproduktion	TTW Elektrische Energie	WTT Energie für die Stromproduktion	WTW Alle Energiequellen		THG- Emissionen G CO ₂ eq / km		
					Total	Fossil	TTW	WTT	WTW
	MJ/100km	MJ/100km	MJ _e /100km	MJ/100km	MJ/100km	MJ/100km			
DISI Benzin	142	26	0	0	169	168	105	20	125
DICI Diesel	119	24	0	0	143	142	88	18	106
BEV EU-Mix	0	0	38	86	124	28	0	57	57
BEV Kohle	0	0	38	69	107	68	0	111	111
BEV Wind	0	0	38	5	0	0	0	0	0

Tabelle 18: Auszug aus den zusammengefassten Ergebnissen des WTW Report für 2020+ [58, pp. 5,35,36].

Der TTW- sowie der WTW Report bezieht sich in seinen Ausführungen nur auf die Darstellung des europäischen Raums. Wie bereits zuvor erwähnt kann es jedoch je nach Region oder Land zu sehr großen Unterschieden hinsichtlich des Energieaufwandes für die Treibstoff- sowie Elektrizitätsversorgung kommen. Der Global EV Outlook 2017 vergleicht die CO₂ Intensität von Benchmark Elektrofahrzeugen mit Autos mit Verbrennungsmotor. Dabei wurden verschiedene Länder bzw. Regionen verglichen welche sich hinsichtlich der durchschnittlichen PKW-Größe sowie der Kohlenstoffintensität des Elektrizitätsnetzes entsprechend unterscheiden. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die kohlenstoffintensive Stromerzeugung in China die Emissionen pro rein elektrisch gefahrenem Kilometer deutlich über 200 g CO₂/km liegen. Im Vergleich dazu, liegt der Wert für Europa zwischen 50 g CO₂/km und 100 g CO₂/km. Der World EV-Outlook liefert dabei keine konkreten Zahlen, scheint jedoch zu sehr ähnlichen Emissionswerten wie der WTW Report des JEC der europäischen Union zu kommen.

Deutliche Unterschiede zeigen sich auch im Vergleich zu Frankreich, welches vor allem im Vergleich zu China oder den USA über eine PKW Flotte mit leistungsschwächerer bzw. effizienterer Motorisierung verfügt und durch den hohen Anteil an Atomstrom deutlich geringere Emissionen sowohl für ICE-Fahrzeuge als auch für BEV aufweist. Das obere Ende der in Abbildung 33 dargestellten Balken beschreibt dabei jeweils die im World EV Outlook ermittelten Werte für 2015. Das untere Ende der dunkel gezeichneten Balken stellt den Wert für 2030 unter Berücksichtigung des in Kapitel 1.2 beschriebenen Referenzszenarios (RTS) dar. Die ermittelten Werte unter Betrachtung des 2DS werden durch das untere Ende der hell gezeichneten Balken dargestellt [5, p. 26].

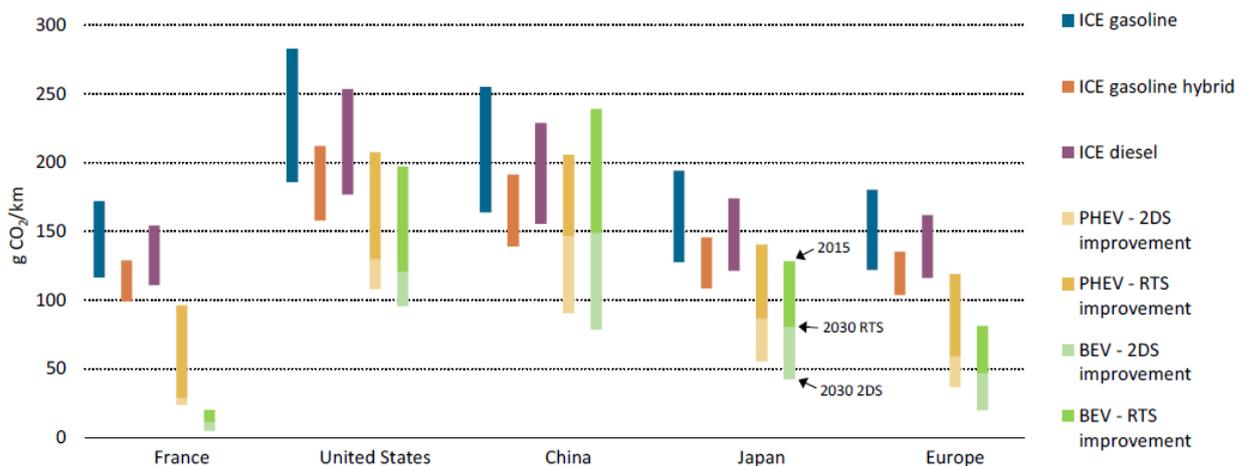


Abbildung 33: WTW CO₂ Emissionen durch leichte Nutzfahrzeuge unterschiedlicher Antriebstechnologien für verschiedene Länder/Regionen: RTS und 2DS, 2015 bis 2030 [5, p. 26].

Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass bei Vergleich der WTW Analyse von BEVs mit jener von ICEVs der Vorsprung der Elektromobilität im Vergleich zur TTW Analyse hinsichtlich eines geringeren Energiebedarfs sowie geringerer THG-Emissionen durch die Berücksichtigung der Treibstoff- bzw. Strombereitstellung deutlich verringert worden ist. Der Unterschied entsteht dadurch, dass bei der Treibstoffbereitstellung nur ein vergleichsweise geringer Energiebedarf besteht während die Stromproduktion des betrachteten EU-Mix erheblich mehr Energie benötigt bzw. THG emittiert. Zu beachten ist jedoch hierbei, dass eine Stromproduktion aus unterschiedlichen Quellen möglich ist, wodurch ein BEV beim Betrieb mit Strom aus Windkraft überhaupt keine THG emittiert, während es bei einer Verwendung von Strom aus einer CO₂-intensiven Quelle wie z.B. aus Kohlekraft sogar zur einer ähnlichen bzw. höheren Umweltbelastung durch THG-Emissionen als bei Autos mit Verbrennungsmotor kommen kann.

3.6 Batterieproduktion

Die WTW Analyse ist hinsichtlich des Energiebedarfs und der durch EVs anfallenden THG-Emissionen vor allem auch in der politischen Diskussion ein häufig verwendeter Ansatz.

Hierbei wird allerdings nur die für die Fortbewegung benötigte Energie betrachtet. Um einen detaillierten Vergleich der Umweltauswirkung zwischen EVs und ICEVs anstellen zu können, ist es erforderlich auch Unterschiede bei der Produktion bzw. nach dem Lebensende zu berücksichtigen. Werden auch diese Faktoren mit einbezogen, spricht man von einer Lebenszyklusanalyse (LCA) oder auch Ökobilanz, welche in der ISO 14040 standardisiert ist. In einer solchen werden zusätzlich auch noch andere Umwelteinflüsse wie Wasserverbrauch oder Emissionen die keine Treibhauswirkung haben berücksichtigt. Der Inhalt dieser Arbeit beschränkt sich darauf, den Energieverbrauch und die THG-Emissionen als einzige Umwelteinflussparameter im Detail zu betrachten. Ein weiterer Unterschied zur WTW ist außerdem, dass eine LCA für eine bestimmte Lebensdauer definiert wird. Für Fahrzeuge wird diese meist zwischen 100.000 km und 200.000 km angenommen [59, pp. 5-6].

Abbildung 34 zeigt die möglichen Unterscheidungen zwischen dem WTW Ansatz und der LCA.

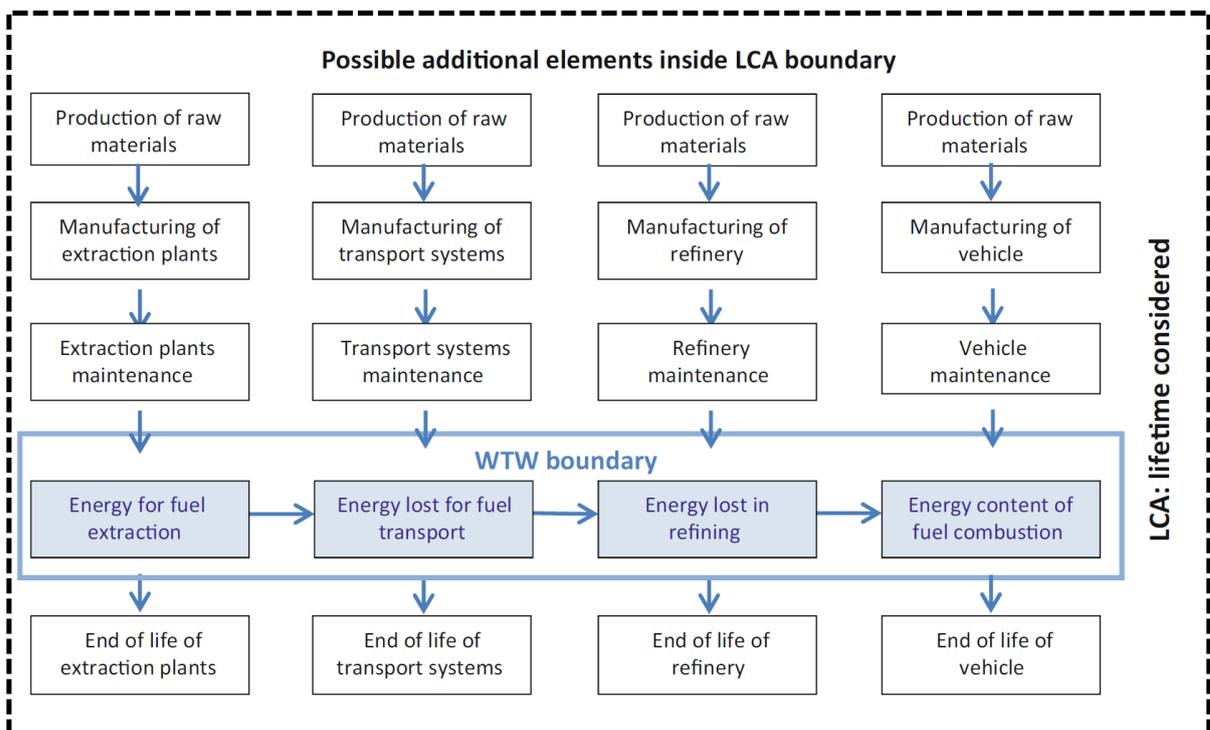


Abbildung 34: Unterschied zwischen WTW und LCA [59, p. 6].

Wie bereits erwähnt, wird bei der Diskussion über den Umwelteinfluss von BEVs zu viel Gewicht auf die Nutzungsphase gelegt und der Produktionsaufwand für die Batterien oft nicht berücksichtigt. Im folgenden Kapitel werden daher die benötigte Energie und die THG-Emissionen bei der Batterieproduktion im Detail betrachtet.

3.6.1 Umweltbeeinträchtigung durch die Produktion der Traktionsbatterie

Es gibt derzeit viele Studien, welche sich mit dem Thema der Umweltauswirkungen der Produktion von LIB beschäftigen. Es zeigt sich jedoch, dass diese sehr unterschiedliche Ergebnisse erzielen, was unter anderem auch an unterschiedlichen Rahmenbedingungen

bzw. dem Kontext den die Studien betrachten, liegt. Auch die Quelldaten (Life Cycle Inventory – LCI) unterscheiden sich sehr häufig, sofern diese überhaupt in den Studien beschrieben werden. Es lässt sich beobachten, dass diese Studien oftmals auf LCI Daten vorhergegangener Publikationen zurückgreifen [60, pp. 492-493].

Im Weiteren wird das Ergebnis einer Studie, welche sich dem Vergleich von mehreren aktuellen Studien bzgl. der Umwelteinflüsse von LIB gewidmet hat dargestellt. Zusätzlich wird auf eine aktuelle Studie mit eigenen LCI Daten, inklusive monatelanger Messungen in einer Batteriefabrik, im Speziellen eingegangen.

Peters et al. (2016)

Peters et al. (2016) [60] untersuchten in ihrer Studie Publikationen zwischen 2010 und 2016 welche sich mit den Umweltauswirkungen durch die LIB Produktion beschäftigen. Insgesamt wurden dabei 79 LCA Studien über LIB gefunden bzw. 34 welche sich speziell mit der Elektromobilität auseinandersetzen. Von diesen 113 Studien wurden schließlich 36 ausgewählt, welche spezielle Kriterien erfüllten, etwa, dass sie detaillierte Informationen hinsichtlich der Produktion liefern oder das Ergebnis auf einer pro kg bzw. pro Wh Speicher (bezogen auf das gesamte Batteriepack) vorliegt. Des Weiteren wurden die Hauptannahmen der Publikationen mit aktuellen Daten aus der Industrie verglichen. Es ist anzumerken, dass sich die Studie nur auf die Produktion beschränkt und das Thema Recycling nicht berücksichtigt. Peters et al. (2016) merkt auch an, dass sich die meisten Studien hauptsächlich mit Energiebedarf und den THG-Emissionen beschäftigen. Andere Umwelteinflüsse wie Toxizität oder Versauerung werden weniger häufig berücksichtigt. Nur vier der von Peters et al. (2016) untersuchten Studien verfügen dabei über eigene LCI Daten. Der Rest kombiniert teilweise vorhandene Daten mit eigenen bzw. stützt sich ausschließlich auf bereits verfügbare LCI Daten vorhergegangener Studien. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass vor allem die Studie von Ellingsen et al. (2013)(siehe nachfolgend) über aktuelle eigene LCI Daten verfügt und es erwartet wird, dass diese Studie eine neue Referenz für zukünftige LCI Daten wird. Die betrachteten Studien weisen dabei zwei unterschiedliche Modellansätze zur Bestimmung der benötigten Energiebedarfs auf, wodurch auch die Ergebnisse hinsichtlich des Batterieherstellungsprozesses um eine Größenordnung beeinflusst werden. Dieser Unterschied dehnt sich darüber hinaus auch auf Studien aus, welche sich auf die entsprechenden LCI Daten stützen [60, pp. 492-497].

Der **Top-Down** Ansatz verwendet Daten aus der Industrie für eine komplette Produktionsanlage. Dabei wird der Bruttoenergiebedarf einer Anlage durch die Produktionsleistung dividiert [60, p. 497].

Beim **Bottom-Up** Ansatz werden die einzelnen Produktionsschritte aufsummiert. Dies entspricht bei den betrachteten Studien entweder ebenfalls Daten aus der Industrie, oder es werden theoretische Überlegungen zu den Anteilen bestimmter Schlüsselprozesse am Gesamtanlagenverbrauch auf diesen extrapoliert [60, p. 497].

Die gesammelten Ergebnisse sind insofern schwer zu interpretieren, da neben unterschiedlich vielen Daten für die unterschiedlichen Batterietypen wie bereits erwähnt auch unterschiedliche

LCI Daten verwendet wurden. Der Großteil der Abweichung lässt sich jedoch auf die unterschiedlichen Modellierungsansätze zurückführen. Allgemein ist jedoch zu erkennen, dass es durch die Top-Down Methode zu tendenziell höheren Werten für den Energiebedarf bei der LIB Produktion kommt, als bei der Bottom-Up Methode. Mittelt man die gesamten verfügbaren Werte für sämtliche LIB-Typen, wie in Abbildung 35 dargestellt, so ergibt sich der Gesamtenergieverbrauch für 1 Wh Speicher einer LIB zu 1.182 MJ oder 328 Wh. Vergleicht man die unterschiedlichen LIB-Typen, so fällt vor allem der hohe Wert von LFP-LTO auf, welcher sich hauptsächlich durch die geringe Energiedichte dieser Batteriechemie erklären lässt bzw. dass nur eine Studie diesen Typ untersucht hat. Außerdem enthält das entsprechende Elektrodenmaterial Nanomaterialien, welche mit einem hohen Produktionsenergieaufwand verbunden sind. Während LMO den geringsten Energieaufwand aufweist, ist auch bei NCA trotz der vergleichbar hohen Energiedichte, ein überdurchschnittlich hoher Wert zu beobachten. Bei dieser Batteriechemie wurde jedoch von nur einer Studie der Bottom-Up Ansatz gewählt, wodurch dieser Wert zumindest teilweise zu erklären ist und für Peters et al. (2016) die Schlussfolgerung zulässt, dass die verwendete Modellierungsmethode womöglich mehr Einfluss auf Ergebnis hat als die verwendete LIB-Chemie [60, pp. 498-499, 503].

Romare und Dahllöf (2017) kommen zu dem Schluss, dass es wahrscheinlich ist, dass die Top-Down-Daten vollständiger sind, da sie den Energieverbrauch von Hilfsprozessen, welche mit der Fertigung verbunden sind, berücksichtigen [34, p. 13].

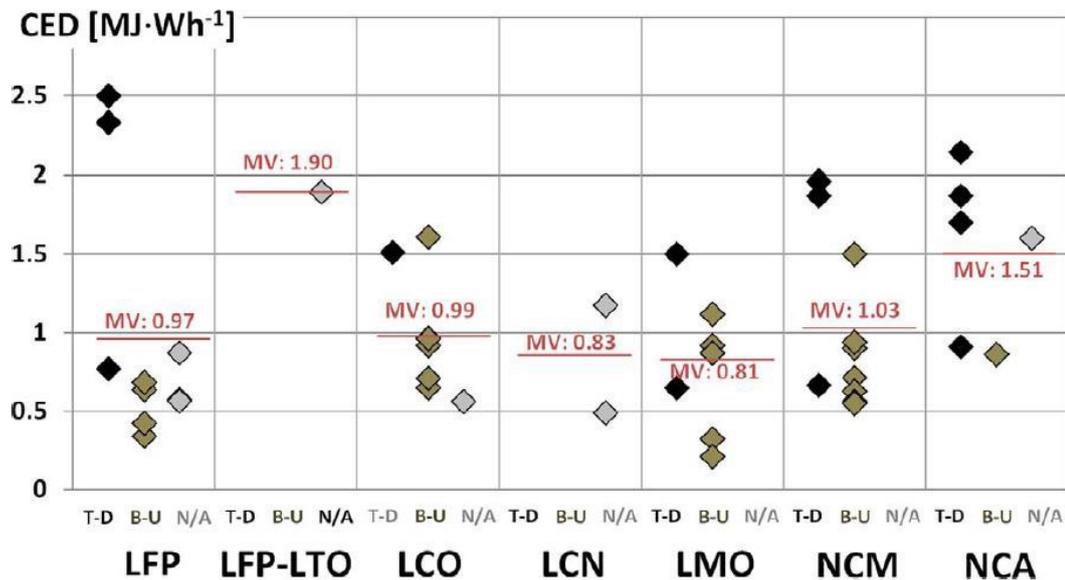


Abbildung 35: Gesammelter Gesamtenergieverbrauch pro Wh Speicher (Batteriepack) für die in Peters et al. (2016) betrachteten Studien, T-D: Top-Down, B-U: Bottom Up, N/A: Nicht angegeben [60].

Ein ähnliches Bild zeigt sich, wie in Abbildung 36 dargestellt, auch bei den durch die Batterieproduktion entstehenden THG-Emissionen. Auch hier unterscheiden sich die Werte der untersuchten Studien für die jeweiligen LIB-Typen in großem Ausmaß hinsichtlich der Wahl der Modellierungsmethode. Vor allem LFP und NMC weisen höhere Emissionswerte als die

restlichen Typen auf bzw. im besonderen LCO und LMO. Peters et al. (2016) weist darauf hin, dass die Emissionen stark vom Verbrauch fossiler Energieträger beeinflusst werden. Dies lässt sich auch in den für die Studien herangezogenen Anteilen fossiler Energieträger am für die Produktion verwendeten Strommix erkennen. Dieser beträgt in allen betrachteten Publikationen zwischen 50 % und 70 %. Werden auch hier die Werte aller betrachteten Studien gemittelt, so ergibt sich die Menge der THG-Emissionen pro kWh erzeugter Speichereinheit zu 110 kg CO₂eq [60, p. 499].

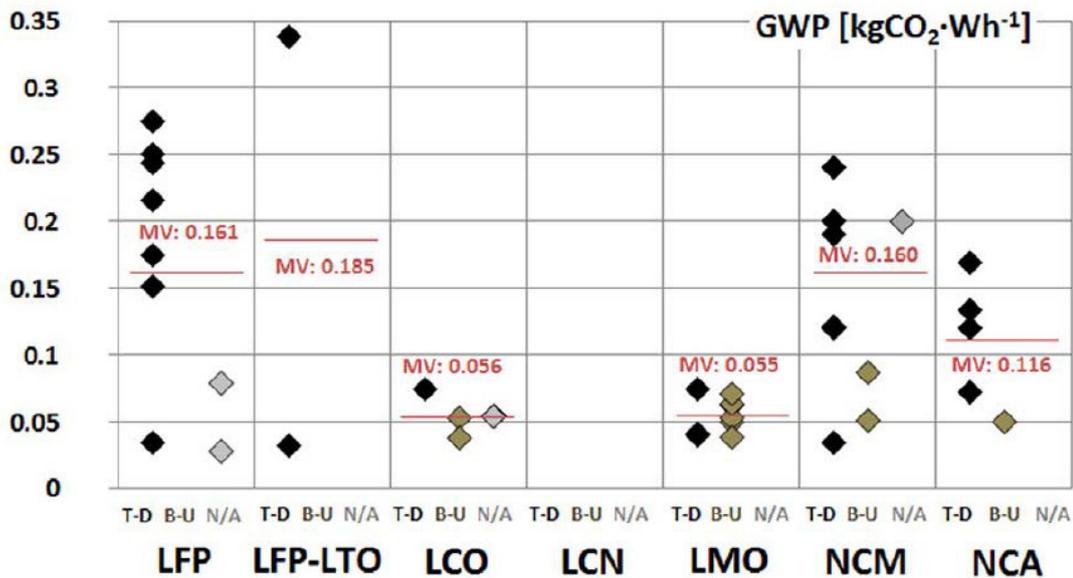


Abbildung 36: Gesammelte THG-Emissionen pro Wh Speicher (Batteriepack) für die in Peters et al. (2016) betrachteten Studien, T-D: Top-Down, B-U: Bottom Up, N/A: Nicht angegeben [60].

Ellingsen et al. (2013)

Ellingsen et al. (2013) führt in ihrer Studie ein Cradle-to-Gate⁸-Lebenszyklusanalyse durch. Die gesammelten Daten stammen dabei von dem norwegischen Batteriehersteller Miljøbil Grendland, welcher Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge produziert. In der Studie wird eine NMC LIB Batterie mit 253 kg und 26,6 kWh betrachtet (105 Wh/kg), wobei die Zellen zu etwa 60 % des Gesamtgewichts beitragen. Der Wirkungsgrad der Batterie wird mit 95-96 % angegeben. Es wird davon ausgegangen, dass die Batterie bei einer Entladetiefe von 100 % eine Lebensdauer von 1.000 Zyklen hat. Wie bereits in Kapitel 2.3.4.5 erwähnt, wird das Ende der Lebensdauer erreicht, wenn die Kapazität einer Batterie 80 % des ursprünglichen Wertes erreicht. Wird die Entladetiefe bei der betrachteten Batterie auf 50 % reduziert erhöht sich die Zyklenzahl bis zum Erreichen dieser Grenze auf 5.000. Insgesamt besteht die Batterie aus vier Komponenten: den Zellen, dem Gehäuse, dem BMS und dem Kühlungssystem. Es werden insgesamt 360 Zellen verbaut, welche sich auf 12 Module aufteilen [1, pp. 5-6].

⁸ Übersetzt: Von der Wiege bis zum Werktor
Leonhard Moser, BSc

Abbildung 37 zeigt das vereinfachte Flussdiagramm der für die Batterieproduktion benötigten Komponenten.

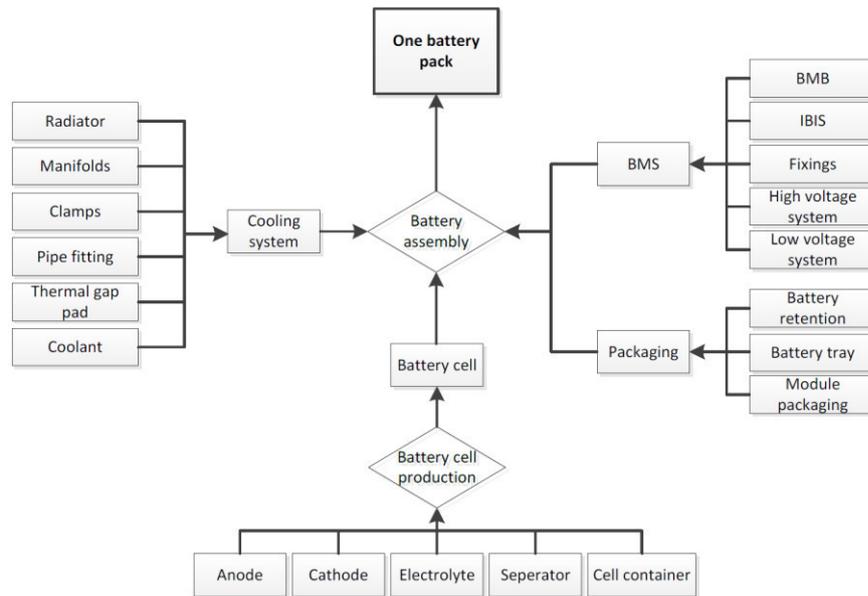


Abbildung 37: Vereinfachtes Flussdiagramm der Batteriekomponenten [1, p. 7].

Für die in Ostasien stattfindende Zellproduktion gehen die Autoren von einem Strommix aus 46 % Kohle, 33 % Nuklear, 15 % Erdgas, 4.4 % Öl, 1.4 % Wasser, 0.15 % Wind, 0.12 % Photovoltaik, und 0.044 % Müllverbrennung aus [1, p. 13].

Über eine Dauer von 18 Monaten wurde der Energiebedarf der Produktionsstätte gemessen. Die Basiszelle des Herstellers ist ein NCM-Typ mit 3,65 V Nennspannung und einer Nennkapazität von 20 Ah, welche mit den Zellen der untersuchten Batterie identisch ist. Es ist anzumerken, dass der Stromverbrauch auch andere Arten von Zellen mit verschiedenen Kapazitäten umfasst. Die Energieanforderungen für die Herstellung der Batteriezellen umfassen das Beschichten von Elektrodenpasten mit Metallfolien als Stromabnehmer, das Verschweißen der Stromabnehmer mit Laschen, das Einfüllen des Elektrolyts sowie das anfängliche Laden der fertigen Zellen [1, p. 8].

Der Batteriezellenhersteller gibt dabei an, dass der vorherrschende Energieverbrauch durch den Betrieb verschiedener Trockenräume entsteht, welche für die Qualität der Batteriezellen von maßgeblicher Bedeutung sind. Im gemessenen Zeitraum ergeben sich erhebliche Unterschiede im Verhältnis vom Stromverbrauch zur Produktionsleistung, was darauf hindeutet, dass in Bezug auf den Energieverbrauch noch Raum für Verbesserungen besteht. Aus der Messreihe wurden verschiedene Werte berechnet: der untere Grenzwert (LBV), der asymptotische Wert (ASV) und der Mittelwert (AVV). Der untere Grenzwert ist der Wert für den energieeffizientesten Monat in welchem 586 MJ pro erzeugter kWh Batteriezellkapazität benötigt wurden, der asymptotische Wert für den Datensatz liegt bei 960 MJ pro kWh Batteriezelle sowie der Durchschnitts Wert bei 2.318 MJ pro kWh Batteriezelle [1, pp. 8-9].

Die gesamten mit der Produktion verbundenen THG-Emissionen sind sehr stark von der benötigten Energie der Produktionsstätte abhängig, wodurch sich auch hier große Unterschiede über den betrachteten Zeitraum ergeben. Während beim LBV 4,6 t CO₂eq der betrachteten Batterie zugeordnet werden können (172 kg CO₂eq/kWh), erhöht sich dieser Wert auf 6,4 t CO₂eq beim ASV sowie 13,0 t CO₂eq beim AVV. Ellingsen et al. gehen davon aus, dass der LBV am besten den Energiebedarf bei großen Produktionsmengen widerspiegelt [1, p. 14].

Zu diesem Ergebnis kommt auch eine Studie von Dunn et. al. (2015) in welcher angemerkt wird, dass Anlagen mit niedrigem Durchsatz höhere Energieintensitäten aufweisen, da einige Geräte und insbesondere die energieintensiven Trockenräume die gleiche Energiemenge unabhängig von der Anzahl der in der Anlage produzierten Batterien benötigen [61, p. 161].

3.6.2 Aufteilung des Energiebedarfs und der THG-Emissionen auf die einzelnen Produktionsschritte

Hinsichtlich des Energiebedarfs und der THG-Emissionen bei der Batterieproduktion stellt sich die Frage, wie viel dabei auf die jeweiligen Produktionsschritte entfällt. Prinzipiell lässt sich die Produktion in drei Schritte unterteilen:

- Abbau und Raffinierung
- Materialverarbeitung
- Herstellung und Montage

In den meisten verfügbaren LCA LIB Studien werden die ersten beiden Punkte kombiniert und gesammelt als Materialproduktion betrachtet [34, p. 19]. Allgemein zeigt sich in den derzeit verfügbaren Studien, dass die Unterschiede in Bezug auf den Energiebedarf bei der LIB Produktion hauptsächlich durch unterschiedliche Annahmen bei der Batteriemontage und weniger bei der Materialproduktion zu finden sind [61, p. 159].

Abbau und Raffinierung

Die Ergebnisse aus LCA Studien unterscheiden sich hier vor allem aufgrund der Verwendung von unterschiedlichen Datenbanken. Beispielsweise variieren die Emissionswerte für die Kobaltproduktion zwischen 90 kg CO₂eq (GaBi) und 8,8 kg CO₂eq (Ecoinvent) pro kg primärem Kobalt. Auch ob primäres oder sekundäres Metall verwendet wird bzw. welches Batteriedesign betrachtet wird, hat Auswirkungen auf den benötigten Energiebedarf und die dabei entstehenden Emissionen [34, p. 20].

Materialproduktion

Romare und Dahllöf (2017) [34] untersuchen in ihrer Publikation die Auswirkungen der einzelnen Batterieproduktionsschritte und vergleichen dabei die Ergebnisse von fünf verschiedenen, wie sie es nennen, Schlüsselstudien, welche sich mit den Emissionswerten für die Materialproduktion von NMC-LIB beschäftigen. Die Autorinnen stellen fest, dass es vor allem durch den begrenzten Einblick in die genauen Technologieschritte, welche für die Batterieproduktion benötigt werden, schwierig ist eine vollständige und vergleichbare

Aufteilung in die verschiedenen Lebenszyklusstadien anzustellen. Die Ergebnisse der Studien, die alle nach 2011 veröffentlicht wurden, liegen dabei relativ gleichmäßig verteilt zwischen 37 kg CO₂eq und 108 kg CO₂eq pro kWh erzeugter Batteriekapazität. Allgemein lässt sich erkennen, dass vor allem das Kathodenmaterial gefolgt von der Anode und dem Elektrolyt einen signifikanten Anteil an den emittierten THG haben [34, pp. 21-23].

Herstellung und Montage

Der Stromverbrauch in der Herstellungsphase ist von großer Bedeutung für die Ergebnisse, wobei anzumerken ist, dass eine Trennung zwischen Materialverarbeitung und Herstellung nicht klar und auch nicht vollständig technisch definiert ist. Es ist möglich, dass ein Teil des Stromverbrauchs in der Zukunft der Materialverarbeitung zugerechnet wird, während dies gegenwärtig für die Herstellung der Fall ist. Der wichtigste Faktor für die Aufteilung kann sein, welche Prozesse am selben Standort durchgeführt werden müssen und welcher Strommix dort verwendet wird [34, p. 21, 61, p. 159].

Die zuvor beschriebene Studie von Ellingsen et al. (2013) kommt zu dem Ergebnis, dass 62 % der mit der Batterieproduktion verbundenen THG-Emissionen auf die Herstellung fallen. Dies hängt jedoch vor allem vom dabei verwendeten Strommix ab. Eine in der Studie durchgeführte Sensitivitätsanalyse (siehe Abbildung 38) zeigt signifikante Unterschiede hinsichtlich der Gesamtemissionen bei unterschiedlichen Stromproduktionsquellen. So steigern sich diese um mehr als 40 %, wenn statt des verwendeten ostasiatischen Strommix von einer Stromproduktion aus Kohle ausgegangen wird. Während bei einer Stromproduktion aus Erdgas keine nennenswerten Änderungen zu beobachten sind, bewirkt eine Verwendung von Strom aus Wasserkraft eine Reduktion der THG-Emissionen um mehr als 60 % im Vergleich zum betrachteten Szenario [1, pp. 19-20].

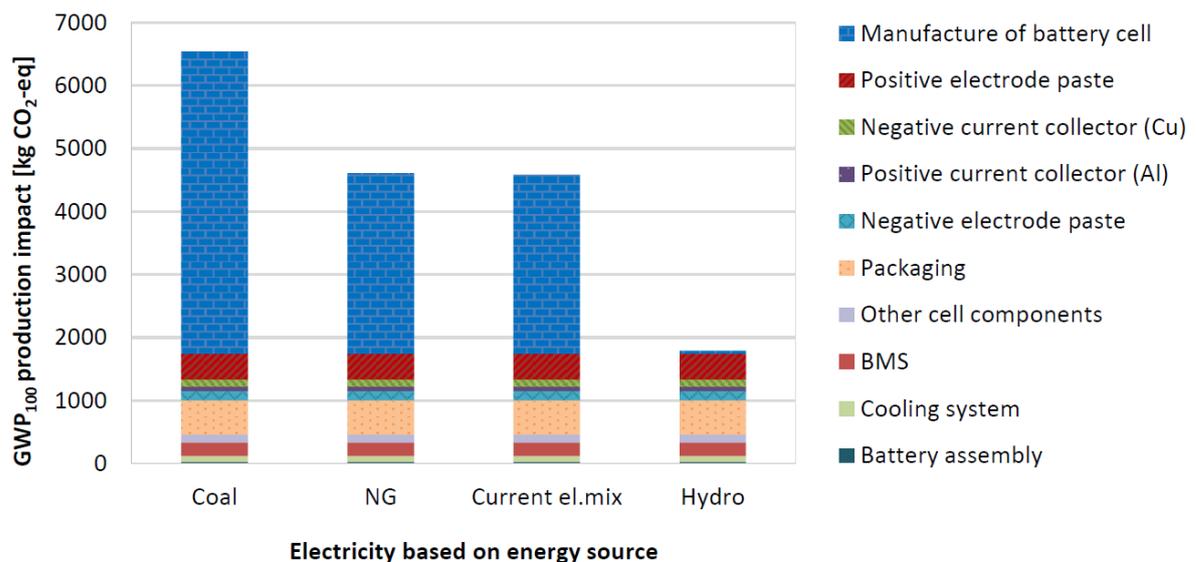


Abbildung 38: Emittierte THG durch die Batterieproduktion in Abhängigkeit der Stromproduktion [1, p. 19].

3.6.3 Recycling

Für die langfristige Nachhaltigkeit von Li-Ionen Batterien ist es absolut essentiell die darin vorhandenen Materialien zu recyceln. Der ökonomische Anreiz hängt dabei vor allem von der Batteriechemie, bzw. dem Anteil von Materialien wie z.B. Nickel oder Kobalt, ab. Der Lithium Anteil spielt dabei derzeit eine untergeordnete Rolle, da recyceltes Lithium etwa fünfmal so teuer ist als die billigste lithiumsolenbasierte Produktion [62, p. 26].

Dieser Aspekt muss berücksichtigt werden, da der wirtschaftliche Wert des Materials nicht immer mit den THG-Emissionen zusammenhängt. Ein Beispiel sind hier LFP LIB. Da keine wertvollen Metalle für die Produktion verwendet werden, ist der Recyclinganteil bei diesem Typ sehr gering. So wird beispielsweise das bei der Produktion mit hohen THG-Emissionen behaftete Aluminium trotz gut entwickelter Recyclingketten nicht wiedergewonnen. Momentan wird Recycling also nur am wirtschaftlichen Wert gemessen, ohne Rücksicht auf etwaige Rohstoffengpässe zu nehmen [34, p. 30].

Richtlinien

Die Europäische Richtlinie für Altfahrzeuge (ELV, 2000/53/EC) definiert, dass 85 % eines Autos (unter 3500 kg) wiederverwendet bzw. wiederverwertet werden soll. Zusätzlich ist die Batterierichtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments seit 2006 in Kraft, in welcher Anleitungen über die Recyclingschritte verschiedener Batterietypen beschrieben sind. Diese definiert auch, dass die Batterieproduzenten Verantwortung hinsichtlich der Einsammlung und des Recyclings der Batterien haben. So müssen 95 % der auf den Markt gebrachten Batterien eingesammelt, bzw. 50 % des Gesamtgewichts recycelt werden. Zusätzlich muss eine Meldung der gesammelten und recycelten Batterien an die Behörden erfolgen [34, p. 31].

Derzeitiger Stand

Dadurch, dass EV Verkäufe erst in den letzten Jahren steigen und im Vergleich zu ICEVs noch immer sehr gering ausfallen, gibt es derzeit kaum Traktionsbatterien die das Ende ihrer Lebensdauer erreichen. Die Herangehensweisen an das Batterierecycling können sich je nach Recyclingfirma unterscheiden. Generell werden die Zellen vom Rest des Batteriepacks getrennt und separaten Recyclingpfaden zugeführt. Nur wenn die Zellen Kobalt oder Nickel enthalten werden diese recycelt. Sind die Zellen vom LFP-Typ, haben diese allerdings keinen materiellen Wert und werden wie bereits zuvor erwähnt der Energierückgewinnung durch Verbrennung zugeführt [34, p. 31].

Aktuelle Recycling Technologien

Derzeit gibt es mit dem pyrometallurgischen Recycling nur eine Technologie, die in annähernd kommerzieller Größenordnung verfügbar ist. Die alternative hydrometallurgische Methode ist mit Ausnahme einer Anlage in Nordamerika nur als Prototyp verfügbar. Die Qualität der recycelten Materialien reicht jedoch zum derzeitigen Zeitpunkt meist noch nicht aus um für eine weitere Batterieproduktion verwendet zu werden. Dies müsste jedoch in Kombination mit einer hohen Recyclingrate gegeben sein um die THG-Emissionen von EVs durch das Batterierecycling zu verringern. Tesla hat allerdings gemeinsam mit Umicore bereits gezeigt,

dass das Wiedereinbinden von recyceltem Kathodenmaterial in den Produktionsprozess eine Reduktion der Umweltbelastung durch die Kathode von 70 % bewirken kann [34, pp. 32-33].

Potenzielle zukünftige Recycling Technologien

Es wird wichtig sein Technologien zu finden, welche es erlauben z.B. Kathoden oder Anoden Material so zu recyceln, dass es direkt wiederverwendet werden kann. Ein Grund warum Batterien das Ende ihrer Lebensdauer erreichen ist, dass das aktive Material mit einer passiven Schicht überzogen wird. Es ist dabei also essentiell die Materialien ohne diese passive Schicht rückzugewinnen, was vor allem auch vom Design zukünftiger Batterien abhängig sein wird. Um die Materialien aktueller LIB-Zellen wiedergewinnen zu können, muss ein Wandel von pyro- zu hydrometallurgischem Recycling erfolgen. Damit ist jedoch nur eine Rückgewinnung der einzelnen Elemente und nicht der kombinierten Materialien möglich. Dies würde mechanische Methoden mit detaillierter Demontage benötigen. Es wird jedoch positiv angemerkt, dass Recycling Firmen nicht mehr nur pyrometallurgische Verfahren verwenden, sondern zusätzlich bereits vermehrt kombinierte Methoden sowie neuartige Technologien einsetzen [34, pp. 34-35].

Energiebedarf und THG-Emissionen durch Recycling

Nur selten werden die beim Recycling anfallenden THG-Emissionen bei heutigen LCA Studien betrachtet. Meist werden die Batterien dabei in die Zellen sowie das restliche Material des Batteriepacks wie beispielsweise das Gehäusematerial eingeteilt. Diese restlichen Komponenten bestehen aus Materialien welche eine gut entwickelte Recyclingkette haben und so im Vergleich zu den Zellen einfacher wiederverwertet werden können [34, pp. 33-34].

Romare und Dahllöff (2017) [34] vergleichen in ihrer Studie verschiedener LCAs welche den Energiebedarf und die THG-Emissionen des LIB Recyclings untersuchen. Die Ergebnisse unterscheiden sich dabei hauptsächlich aufgrund von vier Faktoren: Der Art der Batteriechemie, welcher Recyclingprozess verwendet wurde, die Qualität der recycelten Materialien sowie den Modellierungsannahmen. Aufgrund dieser Unterscheidungen sowie der oft nicht klar definierten Methoden ist es schwierig die Ergebnisse zu vergleichen. Tabelle 19 zeigt einen Auszug der gesammelten Ergebnisse in Form der THG-Emissionen pro kg recycelter Batterie der von Ramare und Dahllöff (2017) untersuchten Studien, wobei jeweils zwischen den Recyclingmethoden und den verwendeten LIB-Typen unterschieden werden muss. Vor allem die Studien für die durch das deutsche Bundesministerium geförderten Pilotprojekte LiBRi (pyrometallurgisch) und LithoRec (hydrometallurgisch) werden als besonders ausführlich hervorgehoben, bzw. wird in diesen speziell auf die Ergebnisse für die einzelnen Recyclingschritte eingegangen. Es wird darauf hingewiesen, dass sich diese Methoden noch in Pilotphasen befinden, wodurch dies keine repräsentative Darstellung der aktuellen Recyclingtechnik darstellt. Es wird festgestellt, dass durch aktuelle Recyclingmethoden der Ökobilanz einer Batterie noch mehr THG-Emissionen zugerechnet werden. Nur wenn hydrometallurgische Recyclingverfahren angewandt werden, kann im besten Fall eine geringfügige Reduktion dieser erfolgen [34, pp. 35-38].

Methoden	g CO ₂ eq/kg Batterie	Batteriechemie
LithoRec (Prototyp)	-1.035	35 % NMC, 35 % NMA, 35 % LFP
Libri (Prototyp)	1.244	35 % NMC, 35 % NMA, 35 % LFP
Umicore (industrielle Größenordnung)	-70 % bzw. -1.500 g CO ₂ /kg Co	LCO

Tabelle 19: Auszug aus den gesammelten Ergebnissen der THG-Emissionen der von Romare und Dahlhoff (2017) untersuchten Studien [34, p. 36].

Das bereits angeführte Pilotprojekt LithoRec wurde zwischen Sommer 2012 und Herbst 2015 als LithoRec II unter der Koordination der Rockwood Lithium GmbH mit den Verbundpartnern Audi AG, ElectroCycling GmbH, H. C. Starck GmbH, Hosokawa Alpine AG, I+ME ACTIA GmbH, Solvay Fluor GmbH, Volkswagen AG, Universität Münster und der TU Braunschweig weitergeführt. Im Frühjahr 2016 wurde schließlich eine Demonstrationsanlage errichtet mit welcher die nachfolgenden Ergebnisse der Ökobilanz ermittelt wurden [63, p. 5].

Das LithoRec II Recyclingverfahren umfasst neben der Entladung und der Zerlegung der Batteriesysteme bis auf die Zellebene auch die Zerlegung und die Separation des Aktivmaterials mittels thermischer Trocknung sowie eine hydrometallurgische Aufbereitung. Als Referenzfluss wurde dabei der Recyclingprozess einer 1.000 kg NMC-LIB gewählt. Ziel des Pilotprojektes ist auch explizit die Rückgewinnung von Metallverbindungen (Kobalt-, Nickel-, Mangan- und Lithiumverbindungen) in batteriefähiger Qualität um wieder für die Elektrodenherstellung verwendet werden zu können. Die gesamten Gutschriften lassen sich aus den Gutschriften der nach dem Recyclingprozess zur Verfügung stehenden batteriefähigen Metallverbindungen sowie weiterer Wertkomponenten (z.B. Aluminium aus Gehäuse) abzüglich der Lasten des Recyclings bestimmen [63, pp. 5, 10, 20].

Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen die Ergebnisse der Ökobilanz hinsichtlich des Treibhauspotenzials (Global Warming Potential – GWP) und des kumulativen Energiebedarfs (CED). Der erste Schritt enthält die Anfahrt der Batterie sowie die Entladung und Demontage dieser. Dabei wird der relativ geringe Beitrag zum GWP bzw. Energiebedarf bei weitem durch die Gutschriften aus dem Recycling der Wertmetalle aufgehoben. Diese kommen hauptsächlich durch Aluminium und Kunststoff zustande, welche in der primären Herstellung einen hohen Aufwand darstellen und in entsprechend großem mengenmäßigem Anteil vorhanden sind. Die meisten THG-Emissionen welche im Schritt der Zellzerlegung und der Separation des Aktivmaterials entstehen (in Abbildung 39 als thermische Aufbereitung angeführt) sind der Aufarbeitung des Lösemittelextrakts und der Verbrennung des Separators zuzuschreiben. Der Energiebedarf für den Prozess der Separation des Aktivmaterials bewirkt in diesem Schritt den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf des Recyclingprozesses. Die Nettogutschriften für GWP und CED durch das Recycling von Aluminium und Kupfer fallen auch hier sehr viel höher aus als die Lasten durch den Recyclingvorgang. Den mit Abstand größten Energiebedarf bzw. Anteil an THG-Emissionen stellt der Schritt der hydrometallurgischen Aufbereitung dar. Der benötigte Hilfsstoff- und Energieeinsatz trägt dazu bei, dass dieser Recyclingschritt trotz der Rückgewinnung von Metallen wie Kobalt und Nickel zu keiner Verbesserung des Gesamtergebnisses führt [63, pp. 29-30, 35].

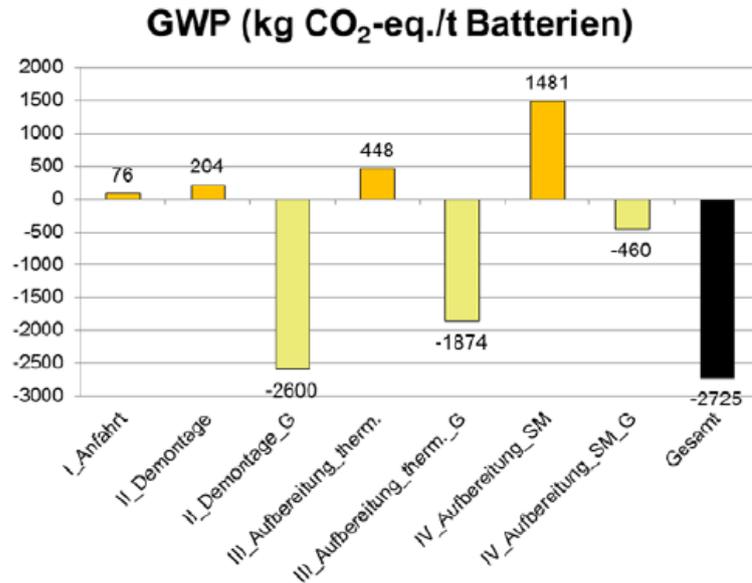


Abbildung 39: GWP des LithoRec II Recyclingverfahren [63, p. 29].

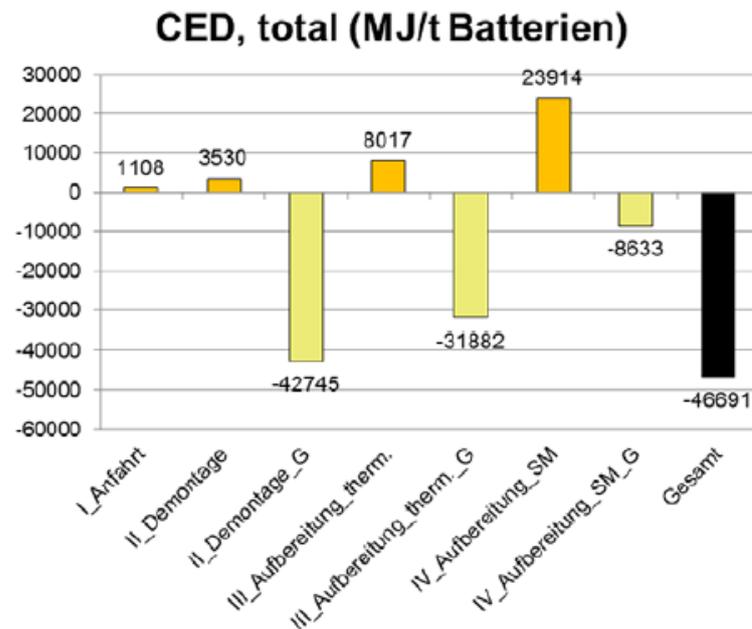


Abbildung 40: Energiebedarf des LithoRec II Recyclingverfahren [63, p. 35].

3.6.4 Second Life

Allgemein werden hohe Anforderungen an Batterien von BEVs gestellt. So wird davon ausgegangen, dass diese das Ende ihrer Lebensdauer erreichen wenn die verfügbare Kapazität 80 % ihres ursprünglichen Wertes erreicht. Eine alternative zum sofortigen Recycling- bzw. Entsorgungsprozess stellt hier die weitere Nutzung der Batterie außerhalb des Verwendungszwecks als Traktionsbatterie in EVs dar [62, p. 25].

Refabrikation

Um für eine etwaige weitere Nutzung in Frage zu kommen reicht es nicht, die Batterie aus dem EV auszubauen und in ein stationäres System zu installieren. Zuerst muss die Batterie nach dem Ausbau einem Qualitätstest unterzogen werden. Diese besteht aus einem Test der einzelnen Komponenten bzw. einer Analyse der im BMS gespeicherten Daten. Je mehr Daten dabei vorhanden sind, desto genauer kann der Zustand der Batterie bestimmt werden. Die Batterie für Tests in einzelne Zellen zu zerlegen wird aus ökonomischer Sicht als problematisch angesehen, da dies den Aufwand, vor allem im Hinblick auf die verschiedenen Zellkonstruktionen erheblich steigert. Unter normalen Umständen können andere Batteriekomponenten wie das BMS oder die Kühlung auch für Second-Use Anwendungen weiterverwendet werden, was zu einer zusätzlichen Kostenreduktion beitragen kann. Ein Pilotprojekt des US National Renewable Energy Laboratory (NREL) zeigt Refabrikationskosten von 25-50 €/kWh [62, p. 26].

Mögliche Anwendungsfälle

Prinzipiell können Batterien unabhängig davon, ob es eine Second-Use Nutzung ist, für viele Anwendungsfälle angewandt werden. Im größeren Maßstab können diese etwa als Batteriespeicherkraftwerke für die Frequenzregelung des Stromnetzes eingesetzt werden. Vor allem aber auch Anwendungen als private Speicher als Backup bzw. in Kombination mit einer PV Anlage sind bereits verfügbar und können durch die Verwendung von Second-Use Batterien in Zukunft billiger werden [62, pp. 15-20].

Potenzielle Marktgröße von Second Use Batterien

Reid und Julve (2016) untersuchen in ihrer Studie die potenziell zukünftige Marktgröße von Second-Use Batterien. Diese ist von mehreren Faktoren abhängig. Neben den Verkaufszahlen und den in den Fahrzeugen verbauten Batterietypen bzw. Kapazität hängt die Anzahl der verfügbaren Second-Use Batterien vor allem vom Kundenverhalten hinsichtlich des Batterietauschs bei ihren Fahrzeugen ab. Auch wie viele der ausrangierten Batterien zur Verfügung stehen und nicht entsorgt bzw. recycelt werden spielt eine Rolle. Am Beispiel Deutschlands wird dabei von dem Ziel der Bundesregierung ausgegangen, bis 2020 eine Million bzw. 2030 sechs Millionen EVs in Deutschland zu haben. Dass dieses 2009 ausgegebene Ziel tatsächlich erreicht wird erscheint allerdings trotz einer Steigerung der Verkaufszahlen auf 54.492 in 2017 (vgl. 25.154 in 2016) als unwahrscheinlich [62, pp. 28-30, 64].

Die Batteriegröße wird im Hinblick auf die in den letzten Jahren immer weiter steigenden Kapazitäten der Traktionsbatterien mit einem durchschnittlichen Wert von 40 kWh angenommen. Da bei allen Batterietauschprogrammen der Hersteller die Rückgabe der alten Batterie erforderlich ist, bzw. teilweise auch durch finanzielle Vergütungen angeregt wird, wird in der Studie davon ausgegangen, dass 80 % der ausrangierten Batterien für Second-Use Anwendungen zur Verfügung stehen. Zusätzlich nehmen Reid und Julve an, dass bei der ersten Generation von EVs die Batterie nach 7 Jahren zu 100 % getauscht werden. Das Ergebnis der Studie zeigt (siehe Abbildung 41), dass bei diesem Szenario bereits 2025

25 GWh bzw. 2030 100 GWh an Kapazität von Second-Use Batterien in Deutschland verfügbar ist [62, pp. 28-30].

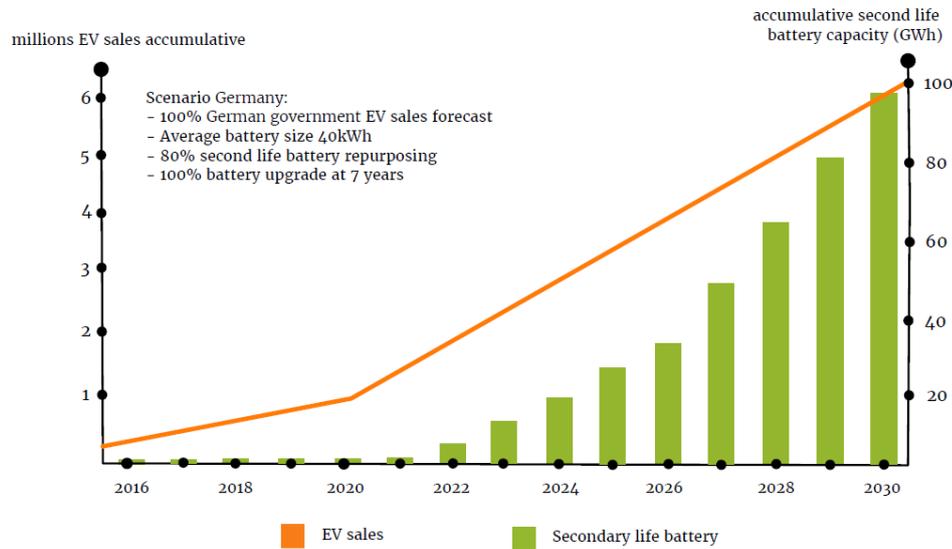


Abbildung 41: Kumulierte EV Verkaufszahlen und Second-Life Batterien in Deutschland [62, p. 30].

Die Autoren weisen allerdings darauf hin, dass noch sehr viele Unsicherheiten hinsichtlich des zukünftigen Marktes für Second-Life Batterien gibt. So gibt es derzeit noch sehr wenige Daten über die Performance heutiger Batterien um auf den Gesundheitszustand schließen zu können bzw. noch weniger über die Performance von Second-Life Batterien. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Daten für unterschiedliche Batterietypen unterscheiden. Auch die Unsicherheit der wirtschaftlichen Rendite bzw. der Markt für Speicheranwendungen werden als mögliche Hindernisse für die Anwendung gesehen. Insgesamt bleibt abzuwarten wie sich Second-Life Batterien im Vergleich mit potenziell neueren Batterietechnologien bzgl. Preis und Performance am Markt positionieren [62, pp. 30-31].

3.6.5 Zusammenfassung der Umweltauswirkungen durch die Traktionsbatterie

Es zeigt sich, dass verschiedene Studien zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der benötigten Produktionsenergie und der dabei emittierten THG kommen. Vor allem die verwendete Methode der Ermittlung (Top-Down oder Bottom-Up) spielt dabei neben der betrachteten Batteriechemie eine entscheidende Rolle. Der durchschnittliche Wert für die THG-Emissionen im Zuge der Produktion eines NMC-Batteriepacks liegt bei den von Peters et al. (2016) betrachteten Studien bei 160 kg CO₂/Wh Speicherkapazität. Dies liegt in einem ähnlichen Bereich wie die 172 kg CO₂eq/kWh, welche Ellingsen et al. (2013) in ihrer Studie ermitteln. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass die Höhe der auftretenden THG-Emissionen auch zu einem Großteil durch die CO₂-Intensität der dafür verwendeten Stromproduktion beeinflusst wird. Der Recyclingprozess wirkt sich bei Verwendung von derzeit verfügbaren Recyclinganlagen mit pyrometallurgischen Verfahren negativ auf die Ökobilanz aus, wobei bereits Pilotanlagen mit hydrometallurgischen Verfahren existieren, welche hier eine positive Bilanz aufweisen.

3.7 WTW mit Berücksichtigung der Batterieproduktion

Moro und Helmers (2015) [59] untersuchten eine Methode die auf dem WTW Ansatz beruht und zusätzlich die Ökobilanz der Batterieproduktion berücksichtigt. Dabei verwenden sie die bereits in Kapitel 3.5 beschriebenen Ergebnisse der WTW Analyse des JEC. Der Vorteil dieser Hybrid-Methode soll die Beibehaltung des relativ einfachen WTW Ansatzes sein, wobei durch die Berücksichtigung des Energieverbrauchs und der Emissionen im Zuge der Batterieproduktion eine Verringerung der Unterschiede zwischen dem populären WTW Ansatz und LCAs ermöglicht werden soll [59, p. 4].

Die Studie verwendet einen Mittelwert mehrerer LCA Studien welche sich mit dem GWP von LIB auseinandersetzen. Diese Studien wurden von Ellingsen et al. (2014) zusammengefasst und mit den Daten ihrer eigenen Studie (siehe Kapitel 3.6.1) kombiniert. Der Mittelwert ergibt sich zu 168 kg CO₂eq/kWh. Die Lebensdauer des Fahrzeuges wird wie im WTW-Report definiert mit 160.000 km angenommen, was sich in einem sehr ähnlichen Bereich wie die in den LCAs betrachteten Lebensdauern befindet. Wird nun die Gesamtemission welche für die Produktion der im WTW definierten 17,4 kWh großen Batterie durch die Lebensdauer dividiert, so ergibt sich ein zusätzlicher Emissionswert pro gefahrenem Kilometer von 18,3 g CO₂eq/km (168 kg CO₂eq/kWh x 17.4 kWh/160.000 km)⁹. Die Emissionseinsparung durch den Betrieb eines BEV gegenüber eines Benzinfahrzeuges verringert sich damit in der betrachteten Konfiguration von 56 % auf 46 % bzw. gegenüber dem Dieselfahrzeug von 46 % auf 33 % [59, p. 11].

Die Autoren geben weiters an, dass hinsichtlich der Interpretation dieses Ergebnisses Vorsicht geboten ist, da hier LCA Daten mit einer definierten Lebensdauer mit dem durchschnittlichen Werten für den Energieverbrauch und die THG-Emissionen während dem Fahrbetrieb verglichen werden. So kann ein Fahrzeug eine höhere Lebensdauer als die angegebenen 160.000 km haben, wodurch eine Ersatzbatterie ebenfalls in die Berechnung mit einbezogen werden müsste [59, p. 11].

⁹ Hier wird darauf hingewiesen, dass die im TTW bzw. WTW Report des JEC definierte Batteriekapazität für das Referenzfahrzeug, anders als von Moro und Helmers angegeben, 17,8 kWh beträgt.

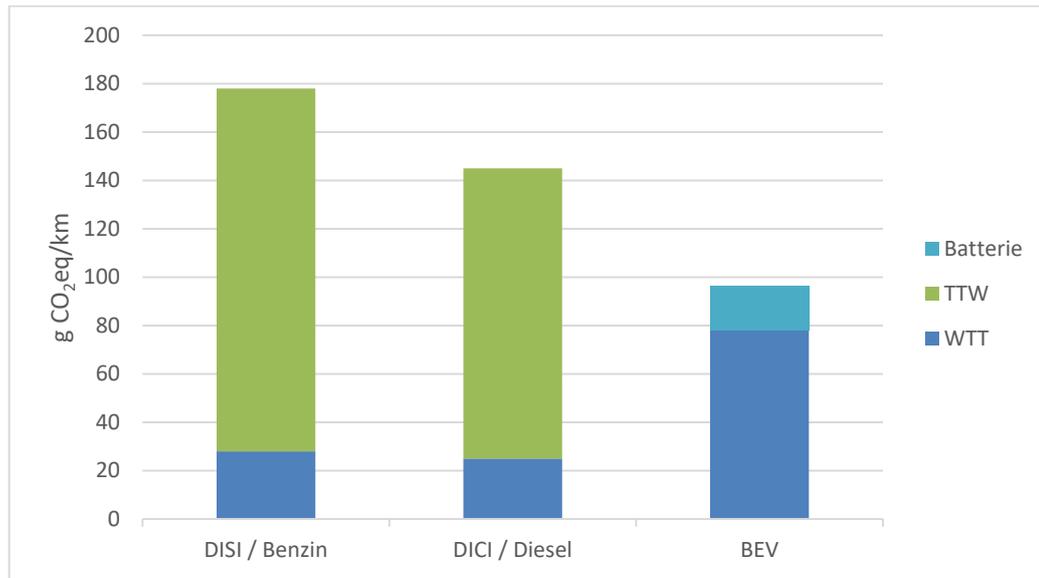


Abbildung 42: THG-Emissionen pro gefahrenem Kilometer für unterschiedliche Fahrzeugtypen [59]. – eigene Darstellung

3.8 Lebenszyklusanalyse

Ellingsen et al. (2016) [51] untersuchten in Ihrer Studie die Auswirkungen von Größe und Reichweite von BEVs auf das GWP. Dabei wurden vier Fahrzeugsegmente, wie in Tabelle 20 dargestellt, gebildet und jeweils ein elektrisch betriebenes Referenzmodell sowie ein Modell mit Verbrennungsmotor definiert. Dazu wurden am Markt verfügbare BEVs welche über eine LIB verfügen und eine Reichweitenangabe nach dem NEFZ vorhanden ist verglichen. Da bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor das Fahrzeuggewicht stark mit dem Treibstoffverbrauch gekoppelt ist, wurde auch hier ein linearer Zusammenhang zwischen Gewicht und Energieverbrauch mit 5,6 Wh/km pro 100 kg zusätzlichem Gewicht angenommen. Für die weiteren Untersuchungen wurden mehrere Studien (LCA Daten) zusammengefügt und adaptiert um so etwas wie eine gängige EV-Produktion widerzuspiegeln bei der die Batterieproduktion in Asien sowie die eigentliche Fahrzeugproduktion und Assemblierung in Deutschland durchgeführt wird [51, pp. 2-3].

Segment	Leergewicht kg	Batteriegröße kWh	Reichweite km	Energiebedarf Wh/km
A - Mini	1.100	17,7	133	146
C – Mittel	1.500	24,4	171	170
D – Groß	1.750	42,1	249	185
F – Luxuriös	2.100	59,9	317	207

Tabelle 20: Parameter der verschiedenen Fahrzeugsegmente [51, p. 3].

Die maximale Batteriekapazität wird für den größten Fahrzeugtyp in der Studie mit 59,9 kWh definiert. Hier sollte angemerkt werden, dass bereits jetzt Luxusmodelle wie das Tesla Model S mit einer Batteriekapazität von 100 kWh auf dem Markt sind und ein klarer Trend in Richtung größerer Speicherkapazitäten von BEV erkennbar ist. So wurde kürzlich die Kapazität bei

mehreren neuen C-Segment Fahrzeugen im Vergleich zu den vorherigen Modellen erhöht. War die erste Generation des Nissan Leaf beispielsweise noch mit einer 24 kWh großen Batterie ausgestattet, so verfügt die zweite Generation (2017) bereits über eine Batterie mit einer Kapazität von 40 kWh [65]. Auch beim Renault Zoe ist seit kurzem neben der 22 kWh Version ein Modell mit 41 kWh im Angebot [66]. Ein weiteres Beispiel ist der VW e-Golf, dessen Batteriekapazität im Vergleich zum Vorgängermodell von 24,2 kWh auf 35,8 kWh gesteigert wurde [67]. Dieser Umstand lässt darauf schließen, dass die in der Studie von Ellingsen et al. (2016) angenommenen Batteriekapazitäten in Zukunft nicht mehr der Norm entsprechen wodurch unter der Annahme von gleichbleibenden THG-Emissionen bei der Batterieproduktion hier mit einer erhöhten Umweltbelastung zu rechnen ist.

Annahmen

Für die Nutzungsphase der EVs wurden zwei Hauptannahmen getroffen. Zum einen wird die Lebensdauer mit 12 Jahren angenommen wodurch sich mit durchschnittlich 15.000 km pro Jahr eine Gesamtkilometerleistung von 180.000 km ergibt. Dies deckt sich mit Studien, die die Umweltauswirkungen von LIB bewerten, und Gesamtfahrdistanzen zwischen 150.000 km und 200.000 km angenommen haben. Zusätzlich dazu werden von den Autoherstellern derzeit Batteriegarantien im Bereich von 100.000 km in den ersten fünf Jahren bis zu einer unbegrenzten Kilometerzahl in den ersten acht Jahren ausgegeben. Da die Autohersteller selbst die Garantien festlegen, ist davon auszugehen, dass diese Garantien das Minimum dessen darstellen, was von den Batteriepacks erwartet werden kann. In Bezug auf die Batterieproduktion wird die Unsicherheit im Zusammenhang mit der Skalierung des Batterieinventars als relativ gering angesehen, da die Batteriezellen und die Modulgehäuse, welche keinen Skalierungsfehlern unterliegen, zu über 80 % der bei der Batterieproduktion anfallenden THG-Emissionen verantwortlich sind. Als Strommix für den Betrieb wird der europäische Strommix mit THG-Emissionen bei der Produktion in der Höhe von 521 g CO₂eq/kWh angenommen. Die Daten für das Recycling (End of Life – EOL) der Fahrzeuge basiert auf einem pyrometallurgischen Verfahren, wobei weder für die Batterie noch für das Fahrzeug eine Verbesserung der über die Lebensdauer emittierten THG erzielt wurde. Für den Vergleich mit Autos mit Verbrennungsmotor wurden von Daimler und Volkswagen veröffentlichte LCA Ergebnisse herangezogen, wobei nur Daten von 2010 oder jünger verwendet wurden [51, pp. 3,6].

Ergebnisse

Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse für die unterschiedlichen Fahrzeuge hinsichtlich der THG-Emissionen über die Lebensdauer. Die Abbildung besteht dabei aus zwei Darstellungen welche jeweils die Emissionen in Tonnen CO₂eq für die Lebensphasen der Fahrzeuge zeigen. Die linke Darstellung zeigt diese dabei in kumulativer Weise über die einzelnen Lebensabschnitte bzw. den gefahrenen Kilometern, während die rechte Darstellung die Gesamtemissionen der einzelnen Phasen darstellt und hier auch gezielt zwischen Fahrzeug und Batterieproduktion unterscheidet. Die grau hinterlegte Darstellung entspricht den jeweiligen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor [51, p. 4].

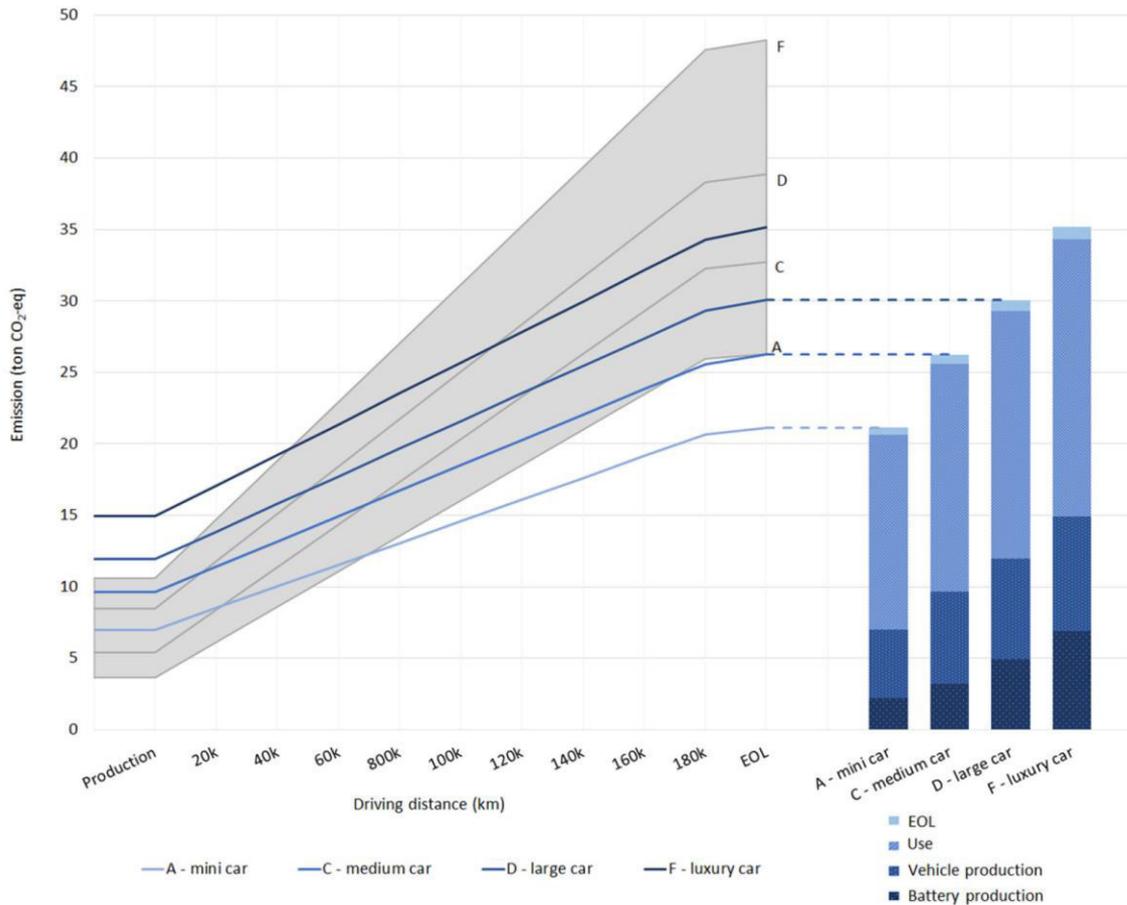


Abbildung 43: THG-Emissionen über die Lebensdauer von verschiedenen Fahrzeugtypen [51, p. 4].

Generell lässt sich erkennen, dass, unabhängig vom Antriebsstrang, kleinere, energieeffizientere Fahrzeuge weniger THG über die Lebensdauer emittieren als größere. Die Unterschiede zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Emissionswert liegen dabei um den Faktor 1,8 bei ICEVs sowie 1,7 bei BEVs auseinander. Bedingt durch die Batterieherstellung, haben BEVs höhere Emissionen als ICEVs bei der Produktion. Durch die geringeren Emissionswerte beim Betrieb kommt es jedoch je nach Fahrzeugsegment zwischen 44.000 km und 70.000 km zum Ausgleichspunkt, wobei dies bei größeren Fahrzeugen früher der Fall ist. Die meisten Emissionen in der Lebensdauer eines Fahrzeuges entstehen in der Betriebsphase, sei es durch direkte Treibstoffverbrennung bei ICEVs oder indirekt in Folge der Stromproduktion bei BEVs. Dem gegenüber sind die Emissionen in der EOL Phase sehr gering und fallen im Vergleich zu Produktion und Betrieb nur wenig ins Gewicht. Bei einem direkten Vergleich der jeweiligen Fahrzeugklassen weisen EVs einen um 20 % bis 27 % verringerte Emission über die Lebenszeit auf. Vor allem die Produktionsemissionen sind jedoch bei EVs höher. Hier ist das GWP bei 6,3-7,1 kg CO₂eq/kg deutlich höher als jenes von ICEVs mit 3,9-5,7 kg CO₂eq/kg Emissionen bei der Fahrzeugproduktion. Dieser Unterschied lässt sich hauptsächlich durch die Batterieproduktion erklären, welche für 31-46 % des Umwelteinflusses der Produktion eines BEVs verantwortlich ist. Die Betriebsphase zeigt sich über die Lebensdauer gesehen für 55-65 % der Emissionen

verantwortlich, wobei davon auf Verluste in der Batterie bzw. im Ladegerät 4 % bzw. 5 % entfallen. Auch die Emissionen durch die EOL Phase sind bei BEVs höher, was sich wiederum durch die Batterie erklären lässt, welche für 14-23 % dieser verantwortlich ist. Insgesamt ist die Batterie für 13-22 % der über die Lebensdauer kumulierten THG-Emissionen verantwortlich. Ein Vergleich mit anderen Studien sowie Berichten aus der Industrie zeigt ähnliche Ergebnisse, wobei die Unterschiede in der Produktion hauptsächlich auf die Batterie sowie beim Betrieb auf die Kohlenstoffintensität des verwendeten Strommix zurückzuführen sind [51, pp. 4-5].

Als Beispiel gibt VW die Produktionsemissionen des e-Golf (C-Segment) mit einer Batteriekapazität von 24,4 kWh mit 9,7 t CO₂eq an, was sich ziemlich genau mit den in der hier betrachteten Studie ermittelten Werten deckt. In dem von VW erstellten Bericht über die Umweltbilanz des e-Golf wird allerdings ein geringerer Energiebedarf während des Betriebs von 127 Wh/km angenommen (NEFZ). In Kombination mit einer Nutzungsphase von 150.000 km und der Verwendung eines nicht näher definierten EU-27-Strommixes ergibt sich daher ein entsprechend geringeres GWP über die gesamte Lebensdauer von 19,1 t CO₂eq. VW geht davon aus, dass eine Verwendung von Ökostrom während des Betriebs die im Lebenszyklus emittierten THG auf 10,0 t CO₂eq reduzieren würde. Im direkten Vergleich zu den Golf Modellen mit Verbrennungsmotor gibt VW eine Reduktion der THG über die Lebensdauer inklusive der genannten Kilometerleistung von 150.000 km um 12 % (Diesel) bzw. 26 % (Benzin) an [68].

Für den Vergleich mit einem A-Segment Fahrzeug kann der VW e-up! herangezogen werden. Auch hier veröffentlichte VW einen Bericht über die Umweltauswirkungen im Vergleich zu selbigem Modell in der Ausführung mit Verbrennungsmotor. Der Verbrauch des mit einer Batteriekapazität von 18,7 kWh ausgestatteten Kleinwagens wird dabei mit 117 Wh/km angenommen (NEFZ) was über die Lebensdauer und 150.000 km Fahrleistung bei Verwendung des EU-27-Strommix ein GWP von 16,7 t CO₂eq ergibt. Der Bericht gibt an, dass eine Verwendung von Ökostrom während des Betriebs eine Reduktion von über 50 % auf 7,5 t CO₂eq bewirken würde. Der Vergleich zu den selbigen VW Modellen mit Verbrennungsmotor (nur Benzin) ergibt eine Verringerung von 22-28 % bzw. 65-68 % bei Verwendung von Ökostrom [69].

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Gesamtkilometerleistung sowie der Unterschiede hinsichtlich des Energiebedarfs pro gefahrenem Kilometer liegen die Werte der beiden VW Modelle in einer sehr ähnlichen Größenordnung wie die in der Studie von Ellingsen et al. (2016) definierten Referenzfahrzeuge.

Um die Auswirkungen der THG-Emissionen im Zuge der Stromproduktion für die Fahrzeugladung auf die Gesamtemissionen der Lebensdauer zu betrachten führten Ellingsen et al. (2016) eine Sensitivitätsanalyse durch. Dabei wurden verschiedene Stromherstellungspfade und die dazugehörigen THG-Emissionen, wie in Tabelle 21 beschrieben, definiert. Bei Szenario *d* wird nicht nur für den Ladestrom, sondern auch für den gesamten

Strombedarf der Lebensdauer eine Stromproduktion aus Windkraft angenommen [51, pp. 5-6].

Szenario	Stromquelle	THG-Emissionen
		g CO ₂ eq/kWh
<i>a</i>	Kohle (weltweiter Durchschnitt)	1.029
<i>b</i>	Erdgas (weltweiter Durchschnitt)	595
<i>c</i>	Wind	21
<i>d</i>	Wind – für den gesamten Lebenszyklus	17

Tabelle 21: Szenarien für die Ladestromproduktion für BEVs [51, p. 5].

Die in Abbildung 44 dargestellten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Stromproduktion ein maßgeblicher Faktor ist, wenn es darum geht, ob ein BEV hinsichtlich der THG-Emissionen umweltfreundlicher ist als ein ICEV. So wird bei der Verwendung von Kohlestrom (Szenario *a*) für die Fortbewegung von BEVs mehr THG emittiert als bei Fahrten mit vergleichbaren ICEVs. In Kombination mit dem Umstand, dass BEVs vor allem auch durch die Batterieherstellung höhere Emissionswerte bei der Produktion aufweisen ergibt sich somit, dass BEVs in dieser Konstellation weniger umweltfreundlich sind als ICEVs und über die Lebensdauer 12-13 % mehr THG emittieren. Wird Erdgas als Primärenergieträger für die Stromproduktion verwendet (Szenario *b*), fallen die Emissionswerte von BEVs im Vergleich zum EU-Mix etwas höher aus, wobei diese über die Lebenszeit gerechnet um 12-21 % geringer sind als bei vergleichbaren ICEVs. Signifikante Vorteile gegenüber ICEVs erreichen BEVs erst bei Szenario *c*, bei welchem von einer Stromproduktion aus Windkraft ausgegangen wird. Hierbei liegen alle BEV-Modelle bei den über die Lebensdauer kumulierten THG-Emissionen unter dem ICEV-Modell mit dem geringsten Emissionswert. Die Emissionswerte sind dabei je nach Fahrzeugmodell um 66-70 % reduziert. Auffällig ist, dass bei diesem Szenario der Umwelteinfluss hauptsächlich durch die Produktionsphase bestimmt wird. Im Falle des Szenarios *d*, bei welchem auch für die Produktion des BEV Strom aus Windkraft verwendet wird sinken die Emissionswerte im Vergleich zu den ICE-Referenzmodellen um 83-84 %, wobei hierbei angemerkt werden muss, dass eine Reduktion der Produktionsemissionen bei den ICE-Referenzmodellen durch den Strom aus Windkraft hier nicht berücksichtigt wurde. War die Batterie zuvor noch für 31-46 % der Emissionen bei der Produktion verantwortlich, so reduziert sich dieser Wert im Szenario *d* auf 23-34 %. Vergleicht man die verschiedenen Szenarien, so lässt sich erkennen, dass die Unterschiede der THG-Emissionen über die Lebensdauer zunehmen, je kohlenstoffintensiver die Stromproduktion ist [51, pp. 5-6].

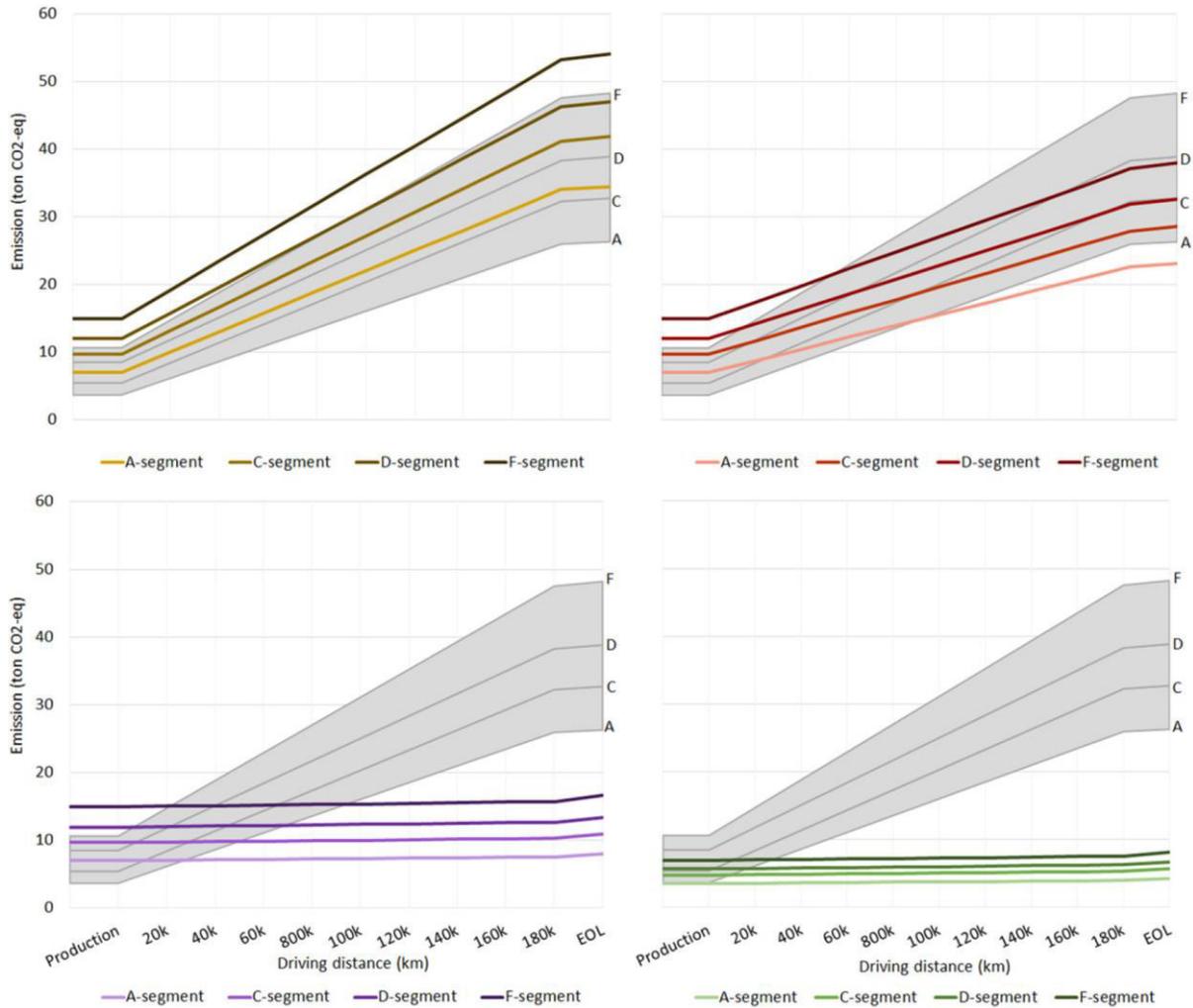


Abbildung 44: THG-Emissionen über die Lebensdauer von verschiedenen Fahrzeugtypen abhängig von der Stromproduktion [51, p. 5].

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass keine generelle Aussage darüber getroffen werden kann, ob BEVs umweltfreundlicher als ICEVs sind. Vor allem aus welchen Primärenergiequellen der Strom für den Betrieb einer BEV produziert wurde hat dabei Auswirkungen auf die Umweltbilanz. Auch wenn bekannt ist woher der Strom für den Betrieb eines BEVs kommt, muss hier gegebenenfalls die Größe bzw. das Gewicht des Fahrzeug sowie die darin verbaute Batterie betrachtet werden. So hat ein BEV größeren Fahrzeugtyps bei Verwendung des EU-Strommix unter Umständen eine schlechtere Umweltbilanz als ein kleinerer Fahrzeugtyp.

Neben der bereits zuvor erwähnten Unsicherheiten hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Verbrauchsangaben durch den NEFZ, hat vor allem die Annahme der Lebensdauer der Batterie Auswirkungen auf die THG-Emissionen über die gesamte Lebensdauer.

Zusätzlich sollte hier angemerkt werden, dass für alle Fahrzeugmodelle mit unterschiedlich großer Batteriekapazitäten dieselbe Kilometerleistung von 180.000 km angenommen wurde. Wie bereits zuvor erläutert ist die Lebensdauer von LIB jedoch neben der kalendarischen

Alterung vor allem von der Zyklenzahl abhängig. Da der Energiebedarf der betrachteten Fahrzeugkategorien nicht im selben Maß ansteigt wie die verwendete Batteriekapazität kommt es hier bis zum Erreichen der angenommenen Kilometerleistung zu einer unterschiedlichen Anzahl an Ladezyklen zwischen den Fahrzeugkategorien. Geht man jeweils von einer Ladung der Batterie auf 100 % mit anschließender Entladung auf 0 % aus, so ergeben sich, wie in Tabelle 22 dargestellt, Zyklenzahlen zwischen 622 beim größten Fahrzeugtyp und 1.485 beim kleinsten Fahrzeugtyp. Es ist daher davon auszugehen, dass die Zellalterung sowie der damit einhergehende Kapazitätsverlust bei den kleineren Fahrzeugen bis dahin bereits weiter fortgeschritten ist als bei den größeren Fahrzeugtypen mit entsprechend größerer Batteriekapazität. Dies sollte bei der Bewertung der Ergebnisse vor allem im Hinblick auf eine potenziell längere Lebensdauer des Fahrzeuges und der Notwendigkeit, die Batterie aufgrund nicht mehr ausreichender Performance austauschen zu müssen, berücksichtigt werden.

Batteriegröße kWh	Energiebedarf Wh/km	Kilometerleistung km	Gesamtenergiebedarf kWh	Zyklenzahl
17,7	146	180.000	26.280	1.485
24,4	170	180.000	30.600	1.254
42,1	185	180.000	33.300	791
59,9	207	180.000	37.260	622

Tabelle 22: Zyklenzahlen der Referenzfahrzeuge von Ellingsen et al. (2016) bis zum Erreichen einer Kilometerleistung von 180.000 km.

3.9 Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse

Es zeigt sich, dass BEVs vor allem beim Betrieb durch die lokale Emissionsfreiheit sowie durch den geringeren Energiebedarf Vorteile in Bezug auf die Umweltauswirkungen gegenüber ICEVs haben. Wird jedoch auch die Bereitstellung der elektrischen Energie für BEVs sowie des Treibstoffs für ICEVs mitberücksichtigt, so verringert sich dieser Vorteil erheblich, sofern die Stromproduktion nicht aus erneuerbaren Quellen erfolgt. Bei dieser WTW Betrachtung kann es im Falle einer sehr CO₂-intensiven Stromproduktion bereits dazu kommen, dass BEVs hier ähnliche bzw. teilweise sogar schlechter Emissionswerte aufweisen als vergleichbare ICEVs. Ein wesentlicher Unterschied zwischen BEVs und ICEV zeigt sich auch bei Betrachtung des Energiebedarfs sowie der THG-Emissionen durch die Produktion der Fahrzeuge. So ergeben sich zwar in Bezug auf Karosserie und Antriebseinheit ähnliche Werte, jedoch fällt bei BEVs die zusätzliche Produktion der Traktionsbatterie mit bis zur Hälfte der gesamten im Zuge der Fahrzeugproduktion auftretenden THG-Emissionen besonders schwer ins Gewicht. Dabei ist jedoch auch die Umweltauswirkung durch die Batterieproduktion stark vom dabei verwendeten Strommix abhängig. Da BEVs nur in der Betriebsphase des Lebenszyklus über ein THG Einsparungspotenzial gegenüber ICEVs verfügen, ist es hinsichtlich einer positiveren Ökobilanz von essentieller Bedeutung, dass die Lebensdauer sowie die dabei erreichbare Kilometerzahl mit jener von ICEVs konkurrieren kann. Dies wird vor allem durch die Lebensdauer der Traktionsbatterie definiert, wobei sich ein gegebenenfalls notwendiger Batterietausch entsprechend negativ auf die Gesamtbilanz auswirkt.

4 Regionalisierung des zusätzlichen Energiebedarfs durch die Elektromobilität

In diesem Kapitel wird der zusätzliche zukünftige Strombedarf durch die Elektromobilität in Europa, bezogen auf die einzelnen NUTS-2-Ebenen betrachtet. Als Ausgangsszenario dient dazu das in Kapitel 1 dargestellte 2DS der IEA. Der derzeitige Strombedarf durch die Elektromobilität wird dabei vernachlässigt.

4.1 Vorgehensweise bei der Ermittlung

Für die Ermittlung des zusätzlichen regionalisierten Energiebedarfs durch Elektrofahrzeuge (PKW) sind drei Fragen von entscheidender Bedeutung:

- 1.) Wie viele Kilometer werden jährlich in den jeweiligen NUTS-Ebenen mit dem PKW zurückgelegt?
- 2.) Wie groß ist bzw. wird der zukünftige Anteil von Elektrofahrzeugen an dieser Kilometerleistung sein?
- 3.) Wie groß ist der durchschnittliche Energieverbrauch heutiger bzw. zukünftiger Elektrofahrzeuge?

Jährliche PKW-Kilometerleistung pro NUTS-2-Ebene

Für die Ermittlung der Kilometerleistung pro NUTS-2-Ebene wurde auf die Datenbank von Eurostat zurückgegriffen. Diese enthält detaillierte Angaben wie viele Autos in den europäischen Ländern sowie auch in den jeweiligen NUTS-2-Ebenen registriert sind. Für etwa die Hälfte der betrachteten Länder, liefert Eurostat zusätzlich Statistiken über die jährlichen PKW-Bewegungen in Fahrzeugkilometern. Da die meisten Daten für das Jahr 2014 vorhanden waren wurden diese verwendet und eine durchschnittliche jährliche PKW-Kilometerleistung für die einzelnen Länder ermittelt.

$$\frac{\text{PKW - Bewegung pro Land}}{\text{Registriert PKW pro Land}} = \text{Durchschnittliche jährliche Kilometerleistung pro PKW}$$

Weiters wurde aus diesen Werten ein Mittelwert gebildet und für die Länder, für welche keine Daten für die Fahrzeugbewegungen vorhanden sind verwendet.

Somit erhält man nach Multiplikation der durchschnittlichen jährlichen Fahrzeugkilometer mit den in der jeweiligen NUTS-2-Ebene registrierten PKW eine Näherung für die in dieser gefahrenen PKW-Kilometer.

$$\begin{aligned} & \text{Registrierte PKW pro NUTS-2-Ebene} \\ & \cdot \text{Durchschnittliche jährliche Kilometerleistung pro PKW} \\ & = \text{Kilometerleistung pro NUTS-2-Ebene} \end{aligned}$$

Anzahl der Elektrofahrzeuge pro NUTS 2 Ebene

Die IEA prognostiziert im Global EV Outlook 2017, dass es im Falle des 2DS im Jahr 2030 weltweit etwa 160 Mio. Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) geben wird. Für die weite Betrachtung wird dabei davon ausgegangen, dass jeder der damit gefahrene Kilometer rein elektrisch betrieben wird. Weltweit gab es 2016 etwa 1,1 Mrd. PKW [2]. Es wird dabei angenommen, dass dies auch für das Jahr 2014 zutrifft.

Mit den 2014 in den jeweiligen NUTS-2-Ebenen angemeldeten PKW und der gesamten weltweiten PKW Anzahl ergibt sich, dass etwa 24 % des globalen PKW Bestands auf die betrachteten europäischen Länder fällt.

Bei gleichmäßiger weltweiter Verteilung der Anzahl der Elektrofahrzeuge würde also das 2DS eine Anzahl von etwa 38 Mio. Elektrofahrzeugen in den betrachteten Ländern für 2030 bedeuten. Die IEA geht für das 2DS davon aus, dass 2030 der globale Marktanteil von Elektrofahrzeugen 18 % sein wird bzw. in EVI Mitgliedsstaaten mit 25 % entsprechend höher ausfällt. Vor allem für Norwegen scheint dieser Marktanteil jedoch zu gering bemessen, da in diesem bereits jetzt 29 % aller neu verkauften Fahrzeuge Elektrofahrzeuge sind. Um diese unterschiedlichen Marktanteile zu berücksichtigen wurde angenommen, dass der Marktanteil mit einer gleichgroßen Marktdurchdringung einhergeht. Für die Ermittlung der Anzahl der Elektrofahrzeuge im 2DS für 2030 in den NUTS-2-Ebenen wurde somit die 2014 in den einzelnen Ebenen registrierten Fahrzeuge zuerst mit den prognostizierten Marktanteilen gewichtet (0,25 für Norwegen, Deutschland, Schweden, Niederlande, Großbritannien und Frankreich; 0,18 für die restlichen Länder) und die Gesamtanzahl anschließend anhand dieser Werte aufgeteilt.

$$38 \text{ Mio. Elektrofahrzeuge} \cdot \frac{\text{Gewichtete Fahrzeuganzahl pro NUTS-2-Ebene}}{\text{Gesamte gewichtete Fahrzeuganzahl der betrachteten Länder}} = \text{Geschätzter Anzahl der Elektrofahrzeuge im Falle des 2DS für 2030}$$

Energiebedarf durch Elektromobilität pro NUTS 2 Ebene

Für die Ermittlung des benötigten zusätzlichen Strombedarfs wurde der Energiebedarf von 170 Wh/km des C-Segment Referenzfahrzeuges aus Kapitel 3.8 als durchschnittlicher Wert verwendet.

Unter der Annahme einer bis 2030 gleichbleibenden durchschnittlichen Kilometerleistung in den betrachteten Ländern lässt sich hiermit der zusätzliche Energiebedarf durch die Elektromobilität für das 2DS für 2030 abschätzen.

$$\begin{aligned} & \text{Prognostizierte Elektroautos pro NUTS-2-Ebene} \\ & \cdot \text{Durchschnittliche jährliche Kilometerleistung pro PKW} \\ & \cdot \text{Energiebedarf pro Kilometer} = \text{Energiebedarf pro NUTS-2-Ebene} \end{aligned}$$

Um eine Aussage über die Änderung des Gesamtstrombedarfs machen zu können, wurde der Energetische Endverbrauch an elektrischer Energie (2016) in einzelnen Ländern gemäß der Bevölkerungsanzahl in den NUTS-2-Ebenen auf diese aufgeteilt.

$$\frac{\text{Bevölkerungszahl pro NUTS-2-Ebene}}{\text{Bevölkerungszahl des Landes}} \cdot \text{Energetischer Endverbrauch el. En. des Landes} \\ = \text{Geschätzter elektrischer Energiebedarf pro NUTS-2-Ebene}$$

Da aus den Daten von Eurostat hinsichtlich des energetischen Endverbrauchs an elektrischer Energie in der Europäischen Union [70] von 2007 bis 2016, wie in Abbildung 45 dargestellt, kein eindeutiger Entwicklungstrend zu erkennen ist, wurde hierbei angenommen, dass auch für 2030 mit einem gleichbleibenden Strombedarf zu rechnen ist.

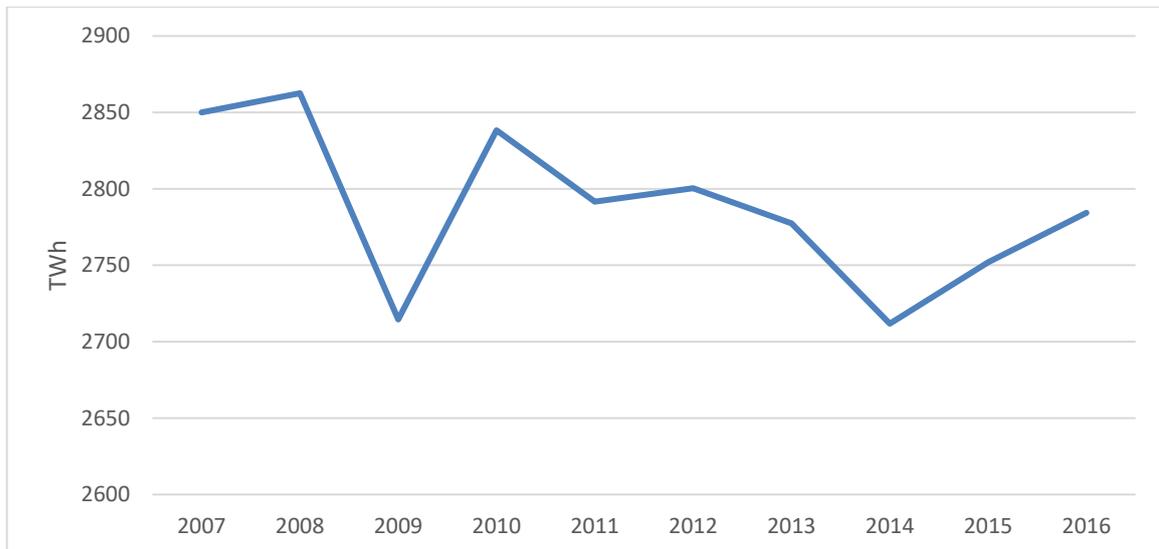


Abbildung 45: Energetischer Endverbrauch an elektrischer Energie in der Europäischen Union.

4.2 Ergebnisse

Tabelle 23 zeigt die länderspezifischen Daten für die Ermittlung des regionalen Strombedarfs durch die Elektromobilität im Jahr 2030 im Falle des 2DS. Insgesamt sind die pro NUTS-2-Ebene registrierten Fahrzeuge für 31 Länder in der Eurostat-Datenbank verfügbar [71], welche für die Darstellung in Tabelle 23 aufsummiert wurden. Die Anzahl der gefahrenen PKW Kilometer sind für 16 Länder verfügbar [72], wobei hier die Kraftfahrzeugbewegungen der im jeweiligen Land registrierten Fahrzeuge sowohl auf nationalem Hoheitsgebiet, als auch im Ausland ausgewertet wurden. Aus diesen Daten wurde eine jährliche durchschnittliche PKW-Kilometerleistung für die entsprechenden Länder berechnet. Zu hinterfragen ist dabei der sich aus den Daten von Eurostat ergebende Wert von nur etwa 4.000 km für Spanien während sich in den restlichen Ländern Werte zwischen 7.500 km und 16.000 km ergeben. Für die restlichen 15 betrachteten Länder wurde ein gemittelter Wert der verfügbaren durchschnittlichen PKW-Kilometer von 12.000 km angenommen. Für den energetischen Endverbrauch an elektrischer Energie in den Ländern wurden die aktuellsten verfügbaren Zahlen des Jahres 2016 aus der Eurostat-Datenbank entnommen [70]. Da die Daten der Schweiz hierbei nicht verfügbar waren, wurden diese einem Bericht des Schweizer Bundesamtes für Energie entnommen [73, p. 5]. Der Bedarf an elektrischer Energie wurden anhand von Daten über die Bevölkerungszahlen der NUTS-2-Ebenen von 1. Jänner 2017 von Eurostat [74] auf diese aufgeteilt.

Die gesamte Berechnungstabelle ist im Anhang (Kapitel 7) dargestellt.

Land	Anzahl der PKW für 2014 [71]	Anzahl der gefahrenen PKW-Kilometer im Jahr 2014 in Mio. km [72]	Durchschnittliche km pro Auto pro Jahr - Berechnet	Durchschnittliche km pro Auto pro Jahr - Annahme	Energetischer Endverbrauch elektrischer Energie von 2016 in TWh [70, 73, p. 5]	EV Marktanteil 2030 laut 2DS in % [5, p. 25]
Estland	652.950	8.212	12.577		7,3	18
Kroatien	1.474.495	18.295	12.408		15,3	18
Ungarn	3.107.695	25.435	8.185		37,1	18
Irland	2.018.180	32.324	16.016		25,6	18
Norwegen	2.538.233	33.841	13.333		113,6	25
Rumänien	4.907.564	36.636	7.465		43,3	18
Finnland	3.179.800	46.800	14.718		80,8	18
Schweiz	4.384.490	55.641	12.690		58,2	18
Schweden	4.584.711	64.531	14.075		127,5	25
Österreich	4.694.921	66.229	14.107		61,9	18
Belgien	5.555.499	78.042	14.048		81,8	18
Spanien	22.029.512	91.518	4.154		232,5	18
Niederlande	7.979.083	103.699	12.996		105,6	25
Polen	20.003.863	175.476	8.772		132,8	18
Vereinigtes Königreich	29.923.519	393.376	13.146		303,9	25
Frankreich	32.529.927	432.813	13.305		442,4	25
Bulgarien	3.013.863			12.000	28,9	18
Zypern	478.492			12.000	4,4	18
Tschechische Republik	4.833.386			12.000	56,1	18
Deutschland	43.816.740			12.000	517,4	25
Dänemark	2.325.665			12.000	31,2	18
Griechenland	5.110.873			12.000	53,4	18
Italien	37.063.708			12.000	286,0	18
Litauen	1.205.668			12.000	9,8	18
Luxemburg	363.247			12.000	6,4	18
Lettland	657.799			12.000	6,5	18
Malta	265.950			12.000	2,1	18
Portugal	4.327.500			12.000	46,4	18
Slowenien	1.068.362			12.000	13,0	18
Slowakei	1.949.055			12.000	25,0	18
Türkei	9.857.915			12.000	228,4	18

Tabelle 23: Länderspezifische Daten für die Ermittlung des regionalen Strombedarfs durch die Elektromobilität in 2030 im Falle des 2DS.

Abbildung 46 zeigt die Anzahl der PKW je NUTS-2-Ebene (2014). Aufgrund der unterschiedlichen Größenordnung der NUTS Ebenen ist jedoch bei der Deutung dieser Darstellung zu beachten, dass größer flächige Ebenen tendenziell auch über eine größere Anzahl an Fahrzeugen verfügen. Vor allem dünn besiedelte Gebiete wie Skandinavien weisen dabei eine geringe Anzahl von Fahrzeugen auf.

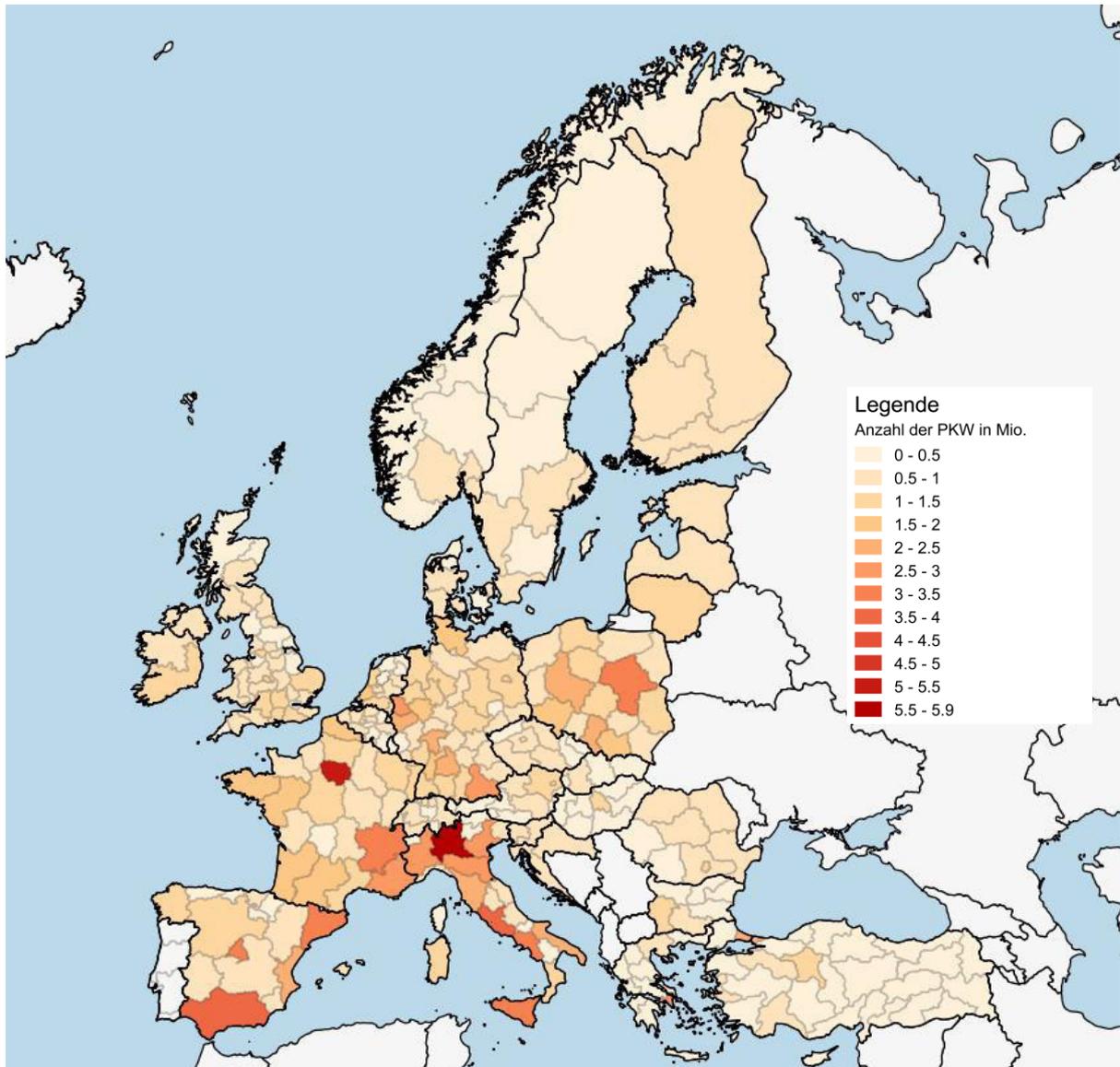


Abbildung 46: Anzahl der PKW in den NUTS 2 Ebenen.

Abbildung 47 zeigt die jährlich mit PKW gefahrenen Kilometer unterteilt in NUTS 2 Ebenen.

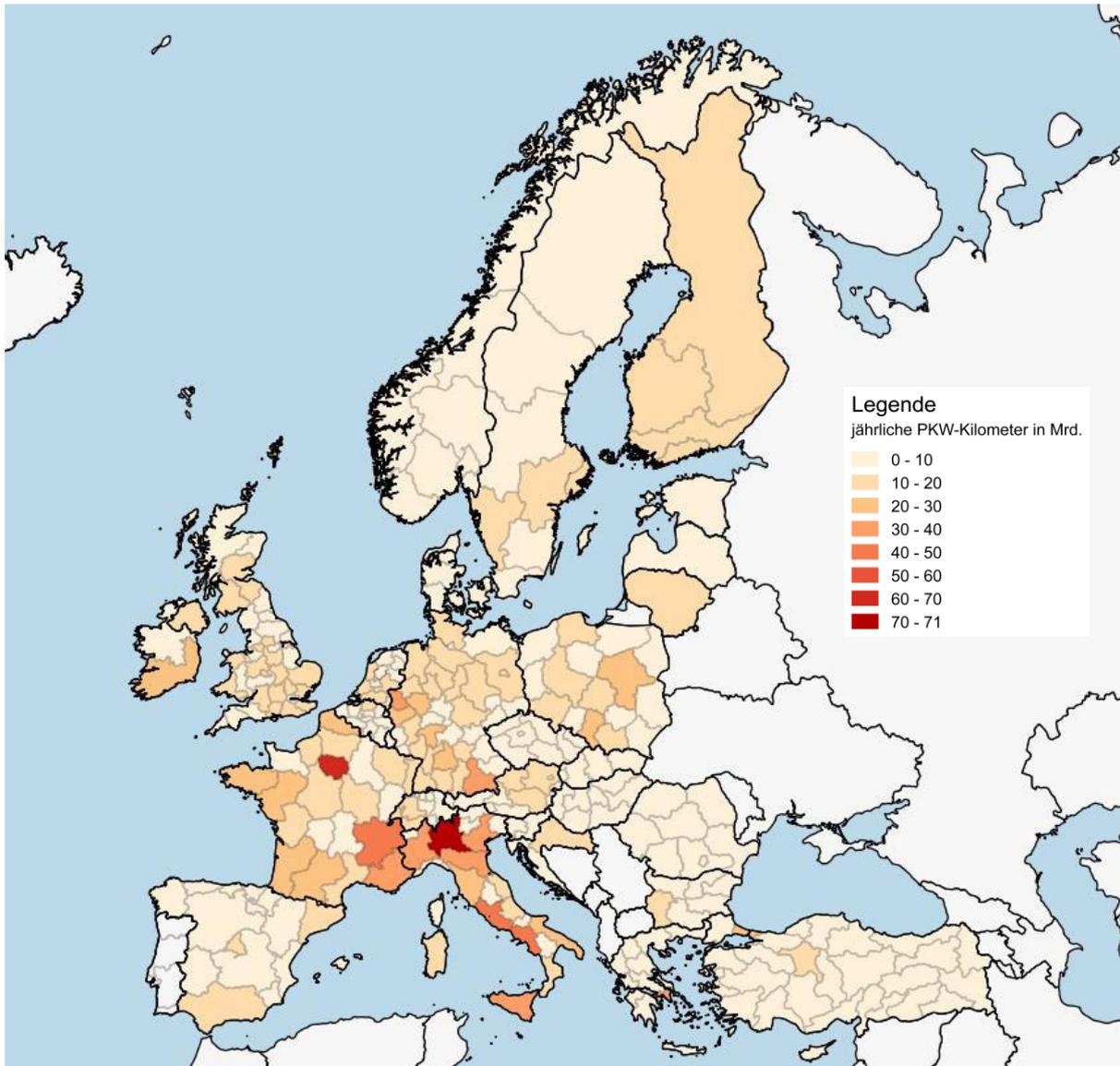


Abbildung 47: Jährliche PKW – Kilometerleistung in Mrd. Kilometer je NUTS 2 Ebene.

Wie bereits zuvor angemerkt ist aufgrund der unterschiedlichen Größe der NUTS Ebenen schwierig die Ergebnisse zu deuten. Um diesem Umstand entgegenzuwirken, wurden die jährlich mit PKW zurückgelegten Kilometer durch die Fläche der entsprechenden NUTS Ebene geteilt. Somit ergibt sich, wie in Abbildung 48 gezeigt, eine Darstellung der jährlich gefahrenen PKW-Kilometer pro Quadratkilometer. Auffällig hierbei ist, dass es vor allem in den Städten bzw. dichter besiedelten Gebieten zu einer hohen Konzentration des Verkehrsaufkommens kommt. Durch die lineare Abstufung der grafischen Darstellung ist es so nicht möglich eine Aussage zu den Unterscheidungen zwischen den ländlichen bzw. weniger dicht besiedelten Regionen Europas zu treffen.

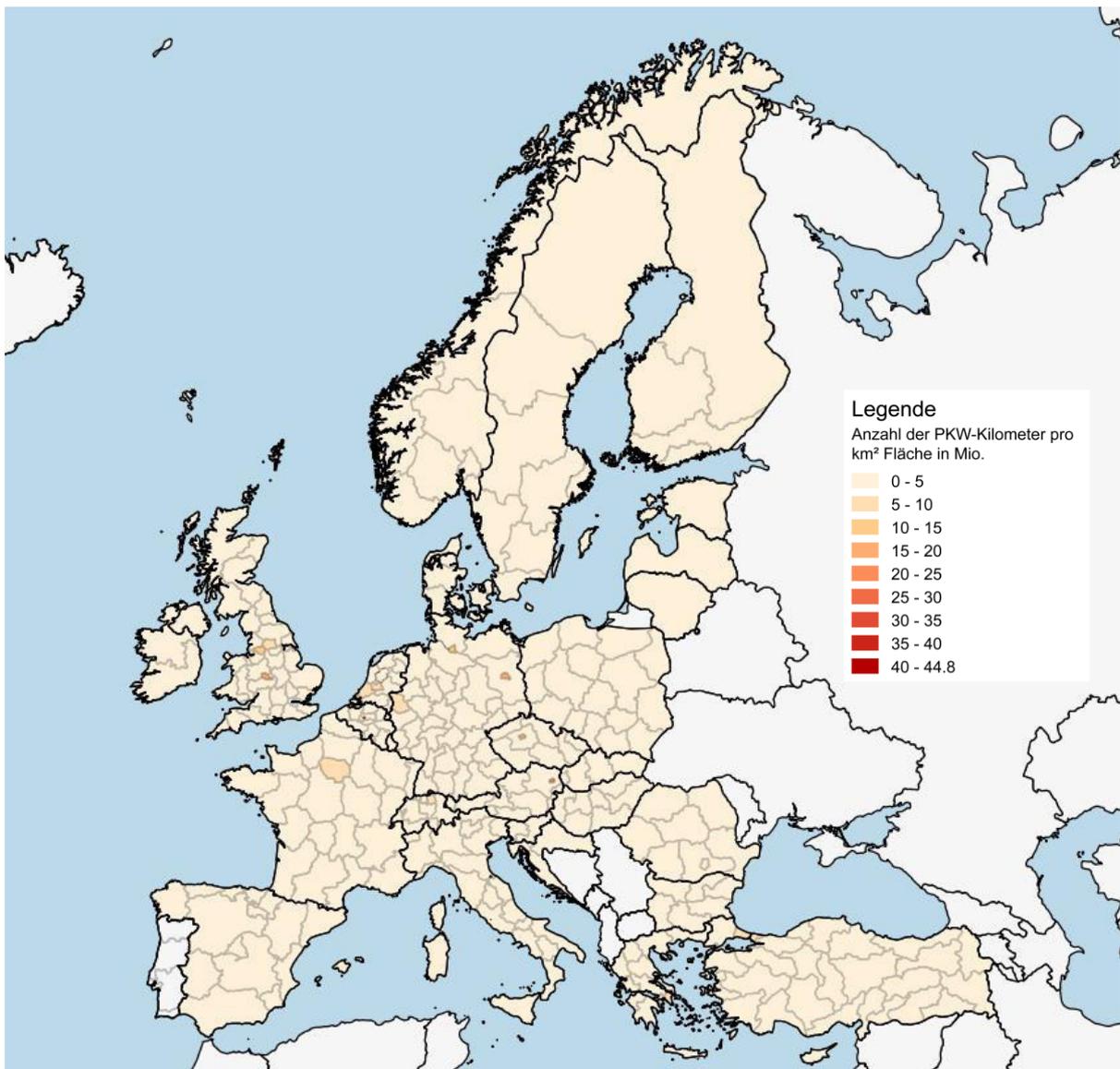


Abbildung 48: Gefahrene PKW Kilometer pro Quadratkilometer Nutzfläche – lineare Klassifizierung.

Aus diesem Grund wurde für Abbildung 49 eine andere Form der Klassifizierung gewählt. Anstatt gleich große Intervalle zu wählen, wird bei dieser eine gleich große Anzahl an Ebenen den jeweiligen Klassen zugeordnet. Dadurch lässt sich nun erkennen, dass neben dünn besiedelten Gebieten Europas wie z.B. Teilen von Norwegen, Schweden und Finnland auch in dichter besiedelten Ländern wie Spanien, Rumänien oder der Türkei ein im Vergleich zu Gesamteuropa geringes Verkehrsaufkommen durch PKW vorherrscht. Neben den dicht besiedelten Gebieten in und um die Großstädte sind es vor allem West- und Mitteleuropa sowie Italien, die die meisten jährlich gefahrenen PKW Kilometer aufweisen.

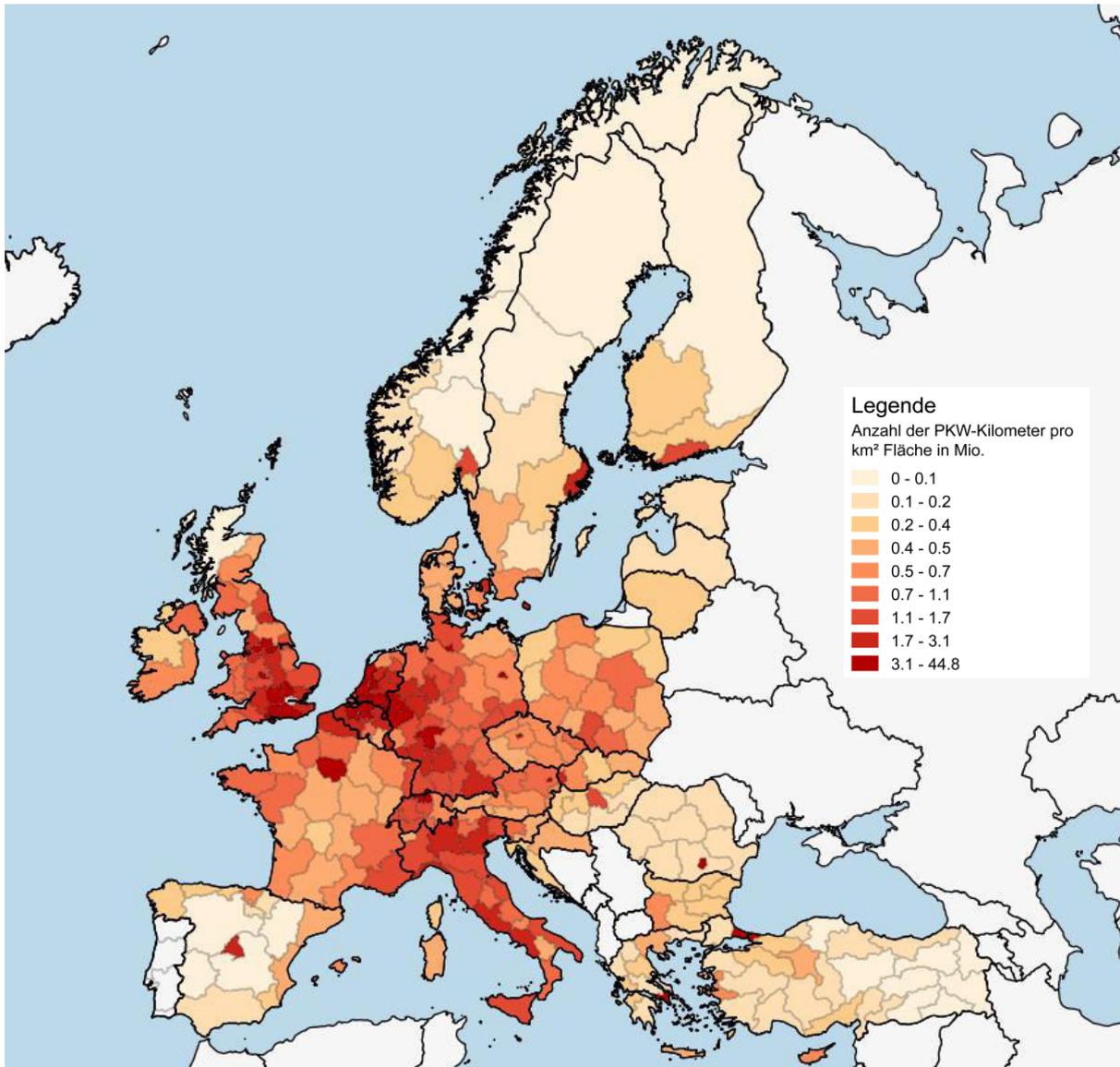


Abbildung 49: Gefahrene PKW Kilometer pro Quadratkilometer Nutzfläche – nichtlineare Klassifizierung.

Abbildung 50 zeigt die Ergebnisse für die Prognose der Anzahl der Elektrofahrzeuge für das 2DS für 2030. Insgesamt werden dabei 38 Mio. Elektrofahrzeuge auf die betrachteten Länder verteilt. Aufgrund der Prognose des 2DS in Bezug auf die 2030 vorherrschenden Marktanteile von Elektrofahrzeugen wurde dabei eine erhöhte Gewichtung auf die EVI Mitgliedsstaaten gelegt, wodurch sich die Darstellung im Vergleich zum aktuellen Fahrzeugbestand (siehe Abbildung 46) unterscheidet.

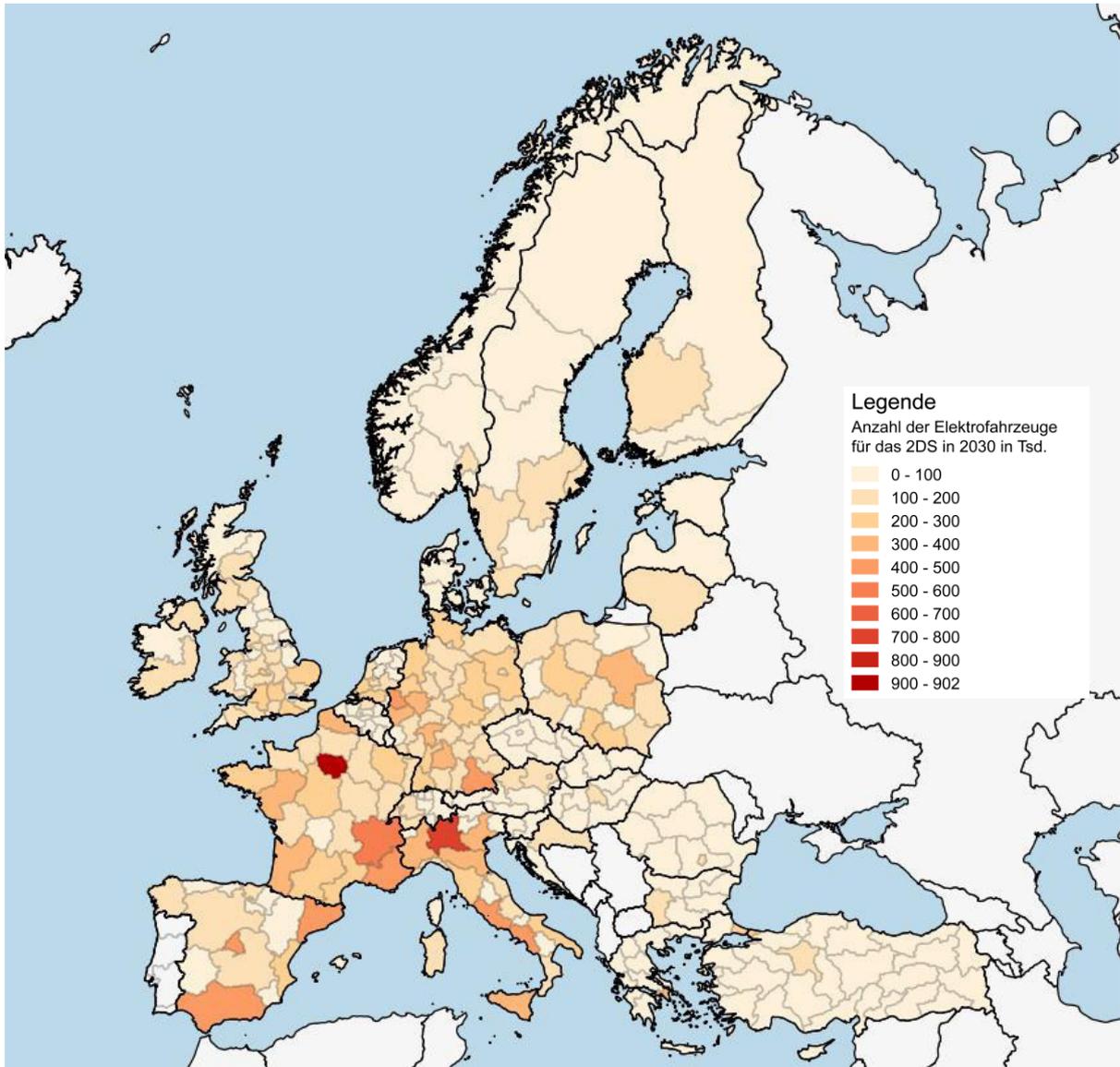


Abbildung 50: Anzahl der Elektrofahrzeuge für das 2DS in 2030.

Durch Multiplikation der Anzahl der angenommenen Elektrofahrzeuge mit der durchschnittlichen Kilometerleistung sowie des Energiebedarfs des Referenzfahrzeuges ergibt sich, wie in Abbildung 51 dargestellte, das Ergebnis der Entwicklung des Energiebedarfs durch die Elektromobilität im Falle des 2DS für das Jahr 2030. Es zeigt sich, dass sich in Frankreich (vor allem um Paris), Italien und Deutschland ein im Vergleich erhöhter Energiebedarf in einzelnen NUTS-2-Ebenen von bis zu 2 TWh pro Jahr ergibt. Auch hierbei ist jedoch eine Vergleich unter den einzelnen Ebenen aufgrund der unterschiedlichen Größe schwierig.

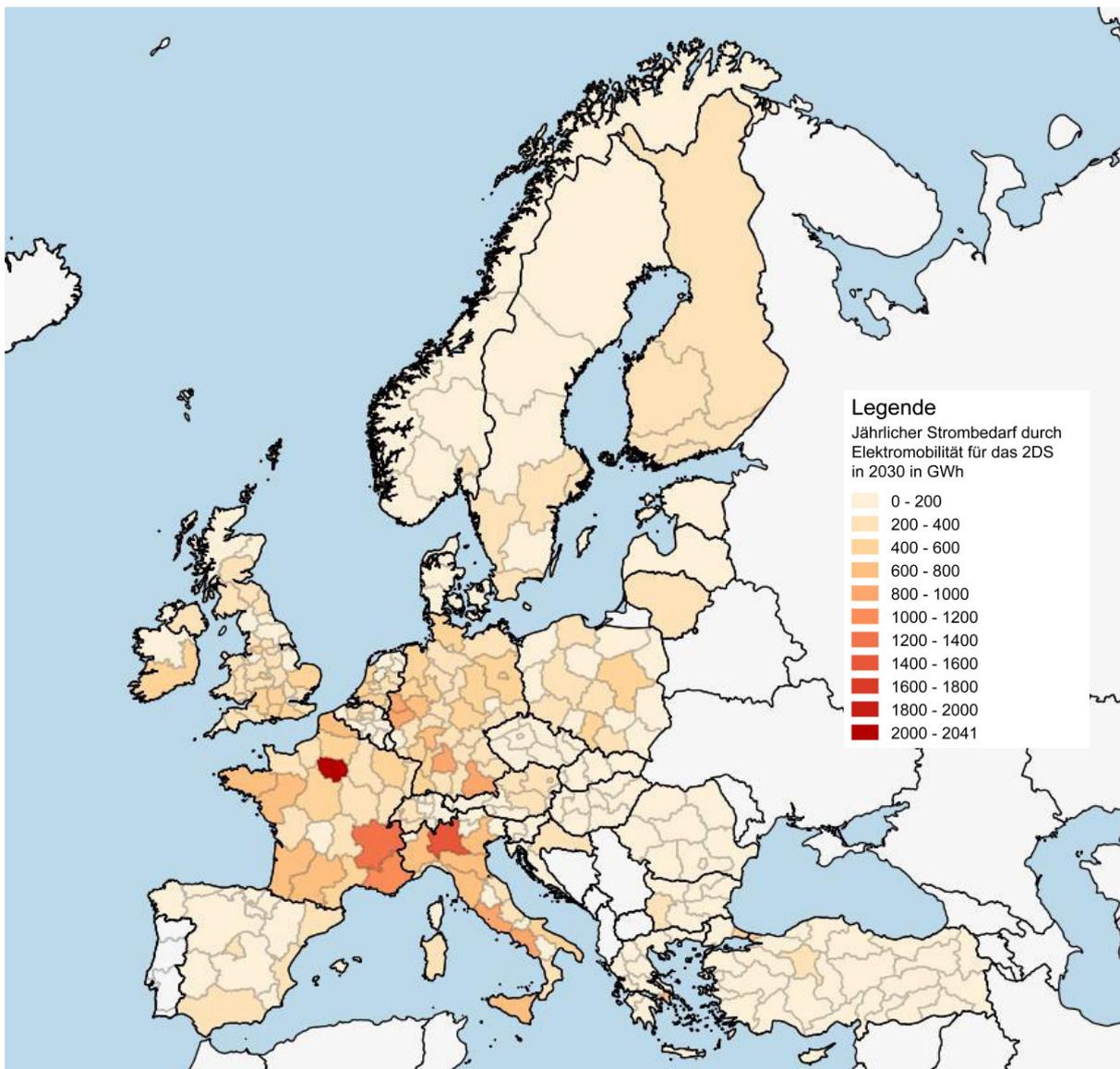


Abbildung 51: Jährlicher Strombedarf durch die Elektromobilität für das 2DS im Jahr 2030.

Eine repräsentativere Ansicht kann hier, wie in Abbildung 52 dargestellt, durch die Abbildung des Energiebedarfs durch die Elektromobilität in Bezug auf den Gesamtstrombedarf der entsprechenden NUTS-2-Ebene erfolgen. Für die Ermittlung des jährlichen Strombedarfs je NUTS-2-Ebene wurde der Bedarf an elektrischer Energie (für das Jahr 2016) der einzelnen Länder entsprechend der Bevölkerungsanzahl in den NUTS-2-Ebenen aufgeteilt. Es zeigt sich,

dass im Falle des 2DS Szenarios die Elektromobilität unter Annahme eines bis 2030 unveränderten Strombedarfs einen Anstieg von durchschnittlich etwa 2,4 % bewirken würde. Erhebliche Unterschiede zeigen sich jedoch im Vergleich der Länder. Hier fällt vor allem auf, dass neben den EVI Mitgliedstaaten, für welche eine höherer Anteil an Elektrofahrzeugen angenommen wird, vor allem in Italien und Litauen mit einem überdurchschnittlichen Mehrverbrauch von über 3 % zu rechnen ist. Die maximale Steigerung des Strombedarfs ergibt sich aus der Berechnung mit 6,2 % für die Region Valle d'Aosta in Italien. Die geringsten Änderungen des Gesamtstrombedarfs durch die Elektromobilität zeigen sich mit etwa 1 % in der Türkei, Norwegen und Spanien. Auffällig hierbei ist, dass sich der regionalisierte Strombedarf durch die Elektromobilität in Bezug auf den regionalen Gesamtstrombedarf auf Länderebene sehr homogen darstellt.

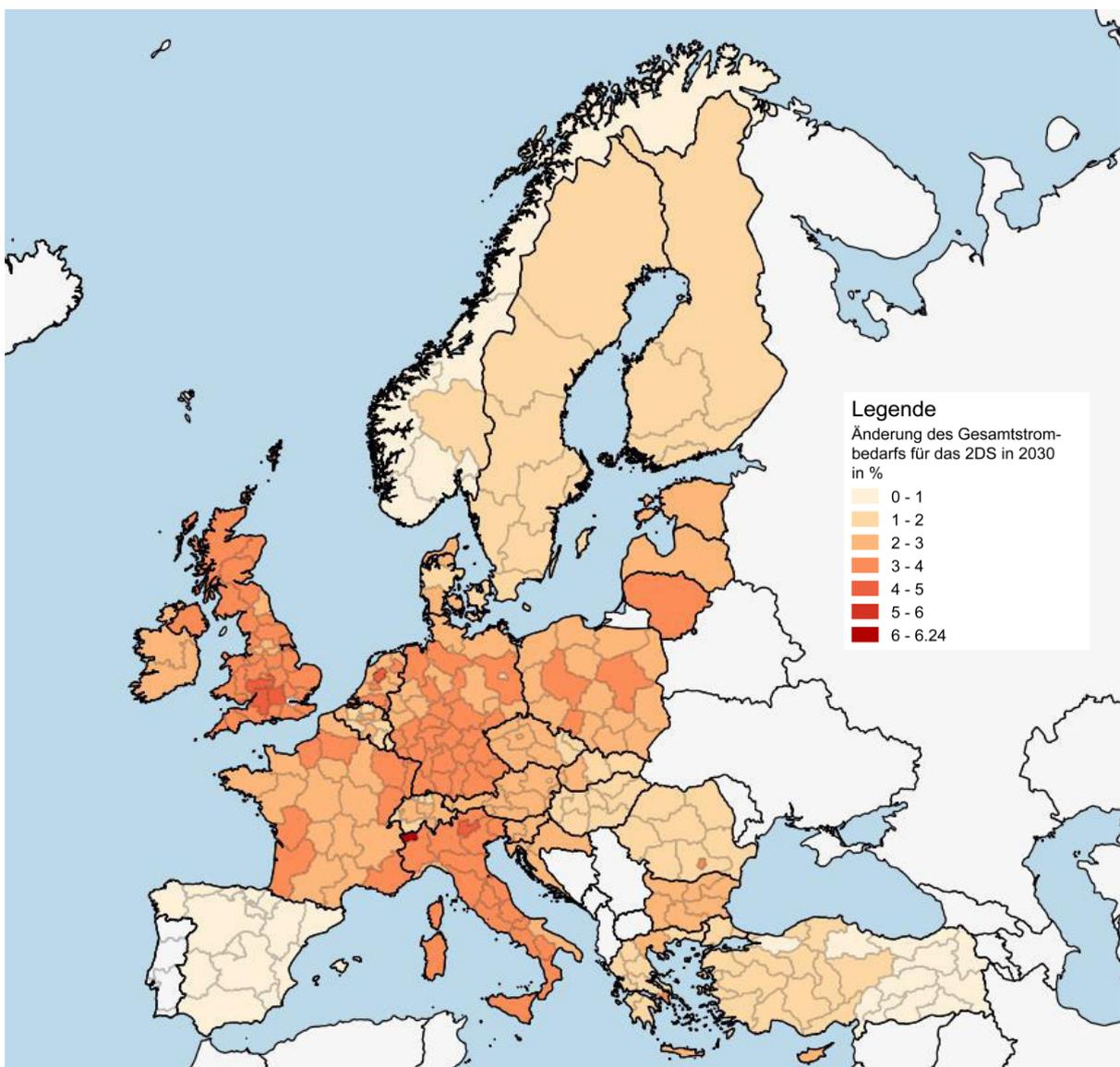


Abbildung 52: Änderung des Gesamtstrombedarfs beim 2DS für 2030.

Ein weiter interessanter Aspekt ist, welche Auswirkungen eine komplette Umstellung des PKW-Verkehrs auf elektrische Antriebe auf den Gesamtstrombedarf hätte. Dazu wurde die ermittelte jährliche Kilometerleistung pro NUTS-2-Ebene mit dem Energiebedarf des Referenzfahrzeuges multipliziert. Es zeigt sich, wie in Abbildung 53 dargestellt, dass dies einen durchschnittlichen Anstieg des Strombedarfs um etwa 16 % zur Folge hätte, wobei sich auch hier erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Ländern ergeben. So würde dieser Umstieg auf Elektromobilität in Italien mit einer Steigerung des Strombedarfs um 26 % einhergehen während der zusätzliche Bedarf in Norwegen nur etwa 5 % betragen würde.

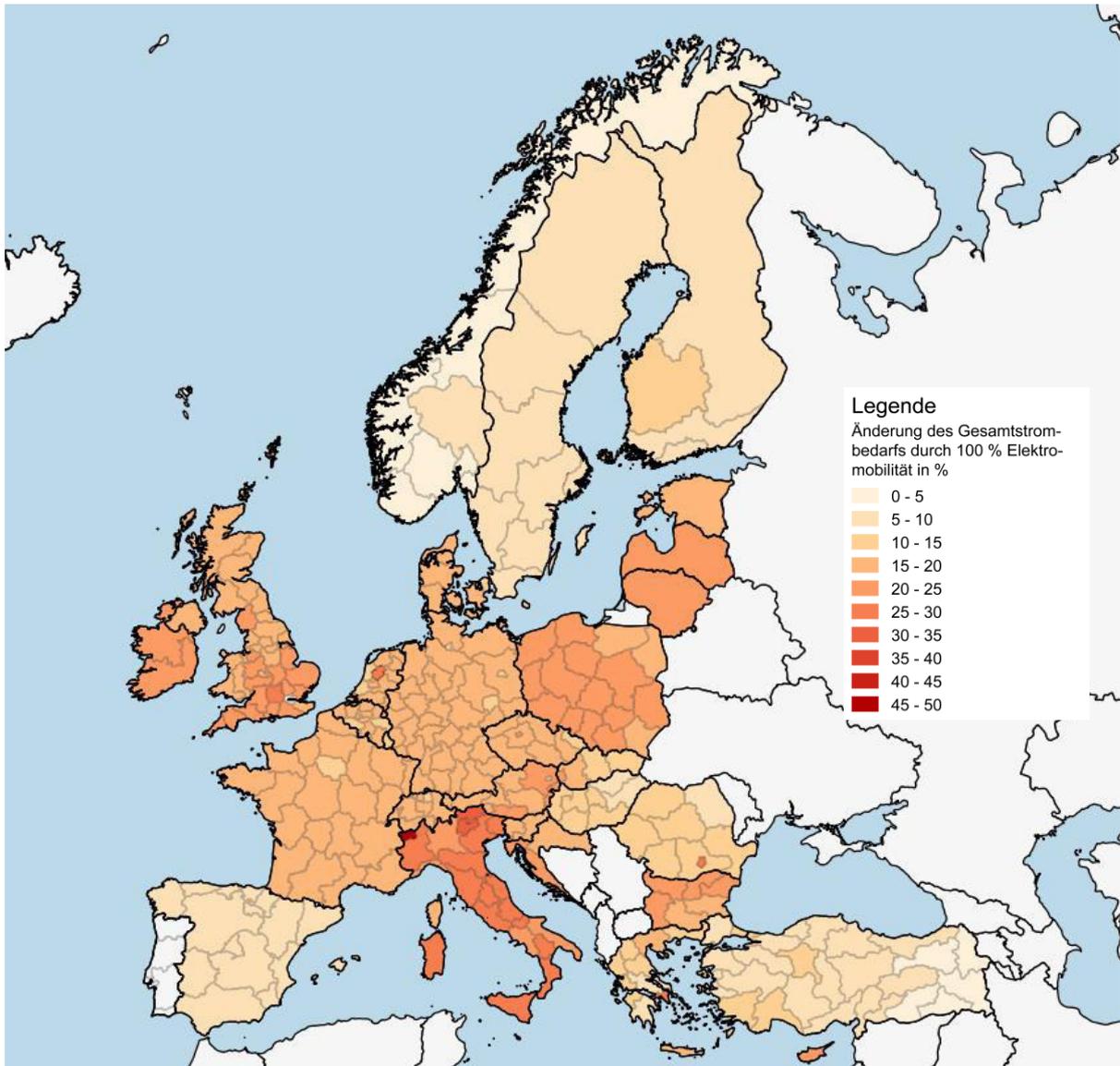


Abbildung 53: Änderung des Gesamtstrombedarfs bei 100 % Elektromobilität.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Umweltauswirkungen von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor vor allem durch die für den Betrieb verwendete Stromproduktion bestimmt werden. Je mehr Aspekte dabei außerhalb des Fahrbetriebs betrachtet werden, desto geringer wird der Vorsprung der Elektromobilität. So wird bei der Produktion von Elektrofahrzeugen erheblich mehr Treibhausgas emittiert als bei vergleichbaren herkömmlichen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Dies liegt hauptsächlich an der energieintensiven Batterieproduktion welche je nach verbauter Batteriegröße für bis zur Hälfte der Produktionsemissionen verantwortlich sein kann. Auch der für die Batterieproduktion verwendete Strommix ist von großer Bedeutung, da wiederum etwa die Hälfte der dabei anfallenden Emissionen aus der Stromproduktion resultieren. Der Betrieb eines Elektrofahrzeuges ist bei Verwendung des europäischen Strommix umweltfreundlicher als jener eines vergleichbaren Autos mit Verbrennungsmotor. Wird dafür jedoch Strom aus einer CO₂-intensiveren Produktion verwendet, ist es möglich, dass Elektrofahrzeuge selbst im Betrieb eine größere Menge an Treibhausgasen emittieren und damit umweltschädlicher sind als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Erst wenn Strom aus erneuerbaren Quellen verwendet wird, lässt sich während des Betriebs bzw. über die Lebensdauer gesehen eine erheblich bessere Umweltbilanz erreichen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist dabei die Lebensdauer der verwendeten Lithium-Ionen Batterie. Diese hängt neben der Anzahl der Lade- und Entladezyklen vor allem von der Temperatur und des verwendeten Zyklusfensters ab. Während der Betrieb sowie die Lagerung bei hohen Temperaturen eine schnellere Degradation der Batterie bewirken, wirkt sich auch die Ladung bei niedrigen Temperaturen negativ auf die Lebensdauer aus. Die Lebensdauer einer Batterie kann dabei erheblich gesteigert werden, wenn nicht die gesamte verfügbare Kapazität der Batterie ausgenutzt wird. Das Ende der Lebensdauer bzw. das Recycling hat sowohl bei Elektrofahrzeugen, als auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor nur eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die Umweltbilanz. Den größten Unterschied stellt jedoch auch hier die Batterie dar. Während derzeit in entsprechender Größenordnung vorhandene Recyclinganlagen zwar der Rückgewinnung bestimmter Materialien dienen, sich aber insgesamt negativ auf die Umweltbilanz auswirken, gibt es bereits Versuchsanlagen welche mit Hilfe von hydrometallurgischen Verfahren eine positive Umweltbilanz aufweisen.

Eine Prognose der Entwicklung der Elektromobilität ist im Moment noch schwierig. Die Auswirkungen auf den Elektrizitätssektor scheinen sich den Ergebnissen nach jedoch in Grenzen zu halten. So ist mit Falle des „2 Grad“ Szenarios der Internationalen Energie Agentur bis 2030 mit einer Zunahme des europäischen Gesamtstrombedarfs durch die Elektromobilität von etwa 2,4 % zu rechnen (Auf Basis des Stromverbrauchs von 2016).

Insgesamt kann gesagt werden, dass die Elektromobilität auf dem derzeitigen Stand der Technik keine bedeutenden Vorteile hinsichtlich des Klimaschutzes bietet sofern kein Strom aus erneuerbaren Quellen für den Betrieb verwendet wird. Um die bestehenden Klimaziele

erreichen zu können, ist es somit essentiell, dass der Umstieg auf die Elektromobilität mit einer Dekarbonisierung des Energiesektors einhergeht und so eine reine Problemverlagerung verhindert wird. Zusätzlich besteht das Potenzial, die derzeit noch drastischen Umweltauswirkungen durch die Batterieproduktion durch die Entwicklung von neuartigen, langlebigen und ressourcenschonenden Batterien zu reduzieren.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

- [1] L. Ager-Wick Ellingsen et al., „Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack,“ *Journal of Industrial Ecology*, Nr. 18, 2014.
- [2] „Pkw- und Nutzfahrzeuge-Bestand weltweit,“ 2018. [Online]. Available: https://www.fahrzeugindustrie.at/fileadmin/content/Zahlen___Fakten/Statistikjahrbuch/Seite5.24_2018.pdf. [Zugriff am 30 05 2018].
- [3] P. Neitzsch, „In welchen Städten jetzt Fahrverbote drohen,“ [Online]. Available: <https://www.impulse.de/auto/diesel-fahrverbot/7301259.html>. [Zugriff am 18 05 2018].
- [4] Der Westen, „Fahrverbote in Europa – In diesen Städten gibt es sie schon,“ 11 03 2018. [Online]. Available: <https://www.derwesten.de/politik/fahrverbote-in-europa-in-diesen-staedten-gibt-es-sie-schon-id213686747.html>. [Zugriff am 18 05 2018].
- [5] IEA, „Global EV Outlook 2017 - Two million and counting,“ OECD/IEA, 2017.
- [6] IEA, „Energy Technology Perspectives 2017 - Catalysing Energy Technology Transformations,“ OECD/IEA, 2017.
- [7] US Energieministerium, „Cost and Price Metrics for Automotive Lithium-Ion Batteries,“ [Online]. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/02/f34/67089%20EERE%20LIB%20cost%20vs%20price%20metrics%20r9.pdf>. [Zugriff am 18 05 2018].
- [8] McKinsey & Company, „Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability,“ 2017. [Online]. Available: https://www.mckinsey.de/files/161223_mckinsey_e-vehicles.pdf. [Zugriff am 18 05 2018].
- [9] N. Zart, „Batteries Keep On Getting Cheaper,“ 2017. [Online]. Available: <https://cleantechnica.com/2017/12/11/batteries-keep-getting-cheaper/>. [Zugriff am 19 05 2018].
- [10] A. Karle, *Elektromobilität - Grundlagen und Praxis*, Carl Hanser Verlag München, 2015.
- [11] D. Kreyenberg, *Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität*, Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [12] P. Kleine-Möllhoff et al., „Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft – Herausforderungen – Potenziale – Ausblick,“ 2012. [Online]. Available: https://www.esb-business-school.de/fileadmin/user_upload/Fakultaet_ESB/Forschung/Publikationen/Diskussionsbeitraege_zu_Marketing_Management/2012-3-Reutlinger-Diskussionsbeitraege-Mark-Mngmt-E-Mobility-Batterie.pdf. [Zugriff am 07 06 2018].
- [13] A. Mahmoudzadeh Andwari et al., „A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Nr. 78, 2017.
- [14] A. Kampker et al., *Elektromobilität - Grundlagen einer Zukunftstechnologie*, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [15] J. Dixon et al., „Electric Vehicle Using a Combination of Ultracapacitors and ZEBRA Battery,“ *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Nr. 57, 2010.

- [16] K. Vuorilehto, „Materialien und Funktion,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2013.
- [17] E. A. Olivetti, „Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals,“ *Joule*, pp. 229-243, Oktober 2017.
- [18] C. Graf, „Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2013.
- [19] D. Kushnir, „Lithium Ion Battery Recycling Technology 2015: Current State and Future,“ *Environmental Systems Analysis*. Chalmers University, Göteborg, Sweden, 2015.
- [20] Battery University, „Types of Lithium-ion,“ 2018. [Online]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. [Zugriff am 06 06 2018].
- [21] Boston Consulting Group, „Batteries for Electric Cars - Callanges, Opportunities, and the Outlook to 2020,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>. [Zugriff am 22 05 2018].
- [22] P. Lamp, „Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2013.
- [23] J.-M. A. M. Tarascon, „Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries,“ *Nature*, Nr. 414, 2001.
- [24] S. Leuthner, „Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2013, pp. 13-19.
- [25] D. Hoffmann, „Alter reduziert Reichweite: Wie lange lebt die Batterie im Elektrofahrzeug?,“ 2015. [Online]. Available: https://www.sgsgroup.de/~media/Local/Germany/Documents/White%20Papers/SGS_Batterie_Lebensdauer_im_Elektrofahrzeug_DE_1015.ashx?force=1. [Zugriff am 19 04 2018].
- [26] M. G. Zeyen und A. Wiebelt, „Thermisches Management der Batterie,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2013, pp. 165-175.
- [27] D. Homewell et al., „Enabling Fast Charging: A Technology Gap Assessment,“ 2018. [Online]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/10/f38/XFC%20Technology%20Gap%20Assessment%20Report_FINAL_10202017.pdf. [Zugriff am 30 04 2018].
- [28] M. Bauer, „Elektrische und mechanische Verfahren zur Detektion von Alterungseffekten in Lithium-Ionen-Batterien,“ 2017. [Online]. Available: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1349733/1349733.pdf>. [Zugriff am 28 04 2018].
- [29] S. Grolleau, „Cycling Aging of Lithium-Ion Batteries,“ 2015. [Online]. Available: http://mat4bat.eu/wp-content/uploads/2014/03/Cycling-Aging-of-Lithium-Ion-batteries_Grolleau_EIGSI.pdf. [Zugriff am 27 05 2018].
- [30] B. P. Mathadi et al., „Effects of Biphenyl Polymerization on Lithium Deposition in Commercial Graphite/NMC Lithium-Ion Pouch-Cells during Calendar Aging at High Temperature,“ *Journal of The Electrochemical Society*, 164, 2017.
- [31] R. Balog und A. Davoudi, „Batteries, Battery Management, and Battery Charging Technology,“ in *Transportation Technologies for Sustainability*, Springer, New York, NY, 2013, pp. 122-157.

- [32] K. Liu et al, *A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles*, 2018.
- [33] T. Schlick et al., „Zukunftsfeld Elektromobilität,“ 2011. [Online]. Available: <https://files.vogel.de/vogelonline/vogelonline/files/3882.pdf>. [Zugriff am 08 06 2018].
- [34] D. Romare, „The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries,“ IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., Stockholm, Sweden, 2017.
- [35] Tesla, „Conflict Minerals Report,“ 29 05 2018. [Online]. Available: https://de.scribd.com/document/380577792/Tesla-Conflict-Minerals-Report#download&from_embed. [Zugriff am 15 06 2018].
- [36] S. Hajek, „Tesla Model 3 kann Gewinn abwerfen,“ [Online]. Available: <https://www.wiwo.de/technologie/mobilitaet/elektroauto-zerlegt-tesla-model-3-kann-gewinn-abwerfen/22625806.html>. [Zugriff am 15 06 2018].
- [37] J. Janek und P. Adelhelm, „Zukunftstechnologien,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2013.
- [38] A. Khalil et al., „Rechargeable lithium batteries and beyond: Progress, challenges, and future directions,“ *MRS Bulletin*, pp. 395-401, Mai 2014.
- [39] R. Dorn et al., „Batteriemanagementsystem,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Heidelberg, Springer Vieweg, 2013, pp. 177-188.
- [40] J. Schäuble und e. al., „Vergleichsstudie von Systemansätzen für das Schnellladen von Elektrofahrzeugen,“ Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, 2016.
- [41] DKE, „Der Technische Leitfaden - Ladeinfrastruktur Elektromobilität - Version 2,“ [Online]. Available: <https://www.vde.com/resource/blob/988408/750e290498bf9f75f50bb86d520caba7/leitfaden-elektromobilitaet-2016--data.pdf>. [Zugriff am 15 05 2018].
- [42] BMW Group,, „Designworks ist Design Partner des Joint Venture IONITY,“ [Online]. Available: <https://www.press.bmwgroup.com/austria/article/detail/T0281365DE/designworks-ist-design-partner-des-joint-venture-ionity>.
- [43] Tesla, „Aufladen von Tesla-Fahrzeugen,“ [Online]. Available: https://www.tesla.com/de_AT/supercharger. [Zugriff am 24 05 2018].
- [44] F. Lambert, „Tesla quietly upgraded its Superchargers for faster charging, now capable of 145 kW,“ [Online]. Available: <https://electrek.co/2016/07/20/tesla-supercharger-capacity-increase-145-kw/>. [Zugriff am 24 05 2018].
- [45] Bundesverband Elektromobilität Österreich, „Österreichs größtes Ladenetz wächst,“ [Online]. Available: <http://www.beoe.at/groesstes-ladenetz/>. [Zugriff am 24 05 2018].
- [46] Smatrics, „Ladestationen in ganz Österreich,“ [Online]. Available: <https://smatrics.com/ladenetz>. [Zugriff am 24 05 2018].
- [47] Chargemap, „Chargemap Statistiken,“ [Online]. Available: <https://de.chargemap.com/about/stats>. [Zugriff am 24 05 2018].
- [48] M. Schmidt, „ Rohstoffrisikobewertung – Lithium. – DERA Rohstoffinformationen 33,“ Berlin, 2017.

- [49] A. Hofacker und C. Köllner, „WLTP und NEFZ im Vergleich,“ 26 Mai 2017. [Online]. Available: <https://www.springerprofessional.de/fahrzeugtechnik/emissionen/wltp-und-nefz-im-vergleich/6560846>. [Zugriff am 09 04 2018].
- [50] K. Borgeest, Manipulation von Abgaswerten - Technische, gesundheitliche, rechtliche und politische Hintergründe eines Abgasskandals, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [51] L. A.-W. Ellingsen et al, „The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles,“ *Environ*, 2016.
- [52] UNECE, „UNECE-Regelung 101,“ [Online]. Available: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R101r3e.pdf>. [Zugriff am 10 04 2018].
- [53] JEC, „Tank-to-Wheels Report Version 4.0,“ Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [54] JEC, „Well-to-Tank Version 4.a.,“ Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
- [55] JEC, „Well-to-Tank - Appendix 4 - Version 4.0,“ Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [56] JEC, „Well-to-Tank Report - Appendix 2 - Version 4a,“ Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014.
- [57] Concawe, „Estimating the marginal CO2 intensities of EU refinery products,“ Concawe, Brüssel, 2017.
- [58] JEC, Well-to-Wheels - Appendix 1 - Version 4.a, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
- [59] H. Moro, „A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles,“ *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Nr. 22, 2015.
- [60] M. B. B. Z. J. B. M. W. Jens F. Peters, „The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Nr. 67, 2016.
- [61] J. B. Dunn, „The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction,“ *Energy & Environmental Science*, p. 158–168, 8 2015.
- [62] G. Reid und J. Julve, „Second Life-Batteries As Flexible Storage For Renewables Energies,“ April 2016. [Online]. Available: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/201604_Second_Life-Batterien_als_flexible_Speicher.pdf. [Zugriff am 13 04 2018].
- [63] M. Buchert und J. Sutter, „Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien,“ Öko-Institut e.V., Darmstadt, 2016.
- [64] W. Pluta, „Elektroautos werden langsam beliebter in Deutschland,“ 22 Jänner 2018. [Online]. Available: <https://t3n.de/news/elektromobilitaet-elektroautos-deutschland-918803/>. [Zugriff am 13 04 2018].
- [65] R. Skarics, „Nissan Leaf: Sauber wie ein Wolkerl,“ 2018. [Online]. Available: <https://derstandard.at/2000073697917/Nissan-LeafSauber-wie-ein-Wolkerl>. [Zugriff am 05 05 2018].

[66] G. Stegmaier, „FAHRBERICHT RENAULT ZOE (2017) Z.E. 40,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.auto-motor-und-sport.de/fahrbericht/renault-zoe-2017-z-e-40-fahrbericht-elektroauto/>. [Zugriff am 05 05 2018].

[67] J. Wolff, „Fahrbericht Volkswagen e-Golf,“ 2017. [Online]. Available: https://www.focus.de/auto/fahrberichte/volkswagen-e-golf-stromer-reloaded_id_6843139.html. [Zugriff am 05 05 2018].

[68] Volkswagen AG, „Der e-Golf - Umweltprädikat - Hintergrundbericht,“ Wolfsburg, 2014.

[69] Volkswagen AG, „Der e-up! - Umweltprädikat - Hintergrundbericht,“ Wolfsburg, 2013.

[70] Eurostat, „Vereinfachte Energiebilanzen - jährliche Daten,“ [Online]. Available: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_100a&lang=de. [Zugriff am 07 03 2018].

[71] Eurostat, „Bestand der Fahrzeuge nach Kategorie und NUTS-2-Region,“ [Online]. Available: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=tran_r_vehst&lang=de. [Zugriff am 20 01 2018].

[72] Eurostat, „Straßenverkehr nach Fahrzeugtyp (Mio. Fzkm),“ [Online]. Available: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_tf_veh&lang=de. [Zugriff am 20 01 2018].

[73] Bundesamt für Energie BFE, „Überblick über den Energieverbrauch der Schweiz im Jahr 2016,“ 06 2017. [Online]. Available: <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/48799.pdf>. [Zugriff am 07 03 2018].

[74] Eurostat, „Bevölkerung am 1. Januar nach NUTS-2-Region,“ [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&pcode=tgs00096&plugin=1>. [Zugriff am 2018 02 20].

[75] IOGP, „International Association of Oil & Gas Producers,“ [Online]. Available: <https://www.iogp.org/>. [Zugriff am 08 06 2018].

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kumulative CO ₂ -Emissionsguthaben für die Szenarien 2DS und B2DS [6, p. 25].	11
Abbildung 2: Verkaufszahlen und Marktanteil von BEVs und PHEVs in ausgewählten Ländern zwischen 2010 und 2016 [5, p. 12].	13
Abbildung 3: Entwicklung des globalen EV-Bestands von 2010 bis 2016 [5, p. 22].	13
Abbildung 4: Entwicklungsszenarien für EV-Fahrzeugbestand bis 2030 [5, p. 25].	14
Abbildung 5: Preisentwicklung von LIB-Batteriepacks zwischen 2010 und 2017 [9]. – eigene Darstellung	15
Abbildung 6: Anforderungen an Traktionsbatterien [12, p. 8]. – eigene Darstellung	20
Abbildung 7: Energie- und Leistungsdichte derzeitiger Batterietechnologien [13, p. 415].	21
Abbildung 8: Komponenten einer konventionellen Lithium-Ionen-Batterie beim Entladevorgang [16, p. 22].	23

Abbildung 9: Vergleich unterschiedlicher Kathoden- und Anodenmaterialien in Bezug auf batteriespezifische Eigenschaften [21, p. 3].....	27
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Aufbaus einer zylindrischen Lithium-Ionen-Zelle [23, p. 361].....	28
Abbildung 11: Kapazitätsverlust bei einer Entladerate von 1C und einem SOC Zyklusfenster von 10-90 % bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen in Abhängigkeit der Ladezyklen [29, p. 36].....	31
Abbildung 12: Kapazitätsverlust bei einer Entladerate von 1C und einer Umgebungstemperatur von 45 °C bei verschiedenen SOC Zyklusfenstern in Abhängigkeit der Ladezyklen [29, p. 41]. – eigene Darstellung.....	32
Abbildung 13: Kapazitätsverlust durch kalendarische Alterung für verschiedene Temperaturen und Ladezustände [30, p. A1090].	33
Abbildung 14: Strom und Spannung der Batterie bei Ladung mit dem CC-CV Verfahren [32, p. 10].....	34
Abbildung 15: Strom und Spannung der Batterie bei Ladung mit dem MCC Verfahren [32, p. 10].....	34
Abbildung 16: Aufbau einer Batterie für den Einsatz in EVs [33]. – eigene Darstellung.....	35
Abbildung 17: Theoretische und prognostizierte praktische Energiedichten verschiedener wiederaufladbarer Batterietechnologien bezogen auf die Zellebene [37, p. 200].....	38
Abbildung 18: Funktionsbereich einer LIB-Zelle [39, p. 178]. – eigene Darstellung	40
Abbildung 19: Spannungsunterschiede in den einzelnen Zellen eines Batteriemoduls [39, p. 181]. – eigene Darstellung.....	40
Abbildung 20: Aufgaben des Thermomanagements in Abhängigkeit der Betriebstemperatur [26, p. 166]. – eigene Darstellung.....	41
Abbildung 21: Entwicklung der Anzahl von Ladestationen von 2010 bis 2016 [5, p. 31].....	46
Abbildung 22: Aufteilung des globalen EV-Bestands und der Ladestationen auf die jeweiligen Länder. [5].....	46
Abbildung 23: Anteile der Top 3 Produktionsländer der jeweiligen Ressource an der Weltproduktion für das Jahr 2015 [17, p. 232].....	47
Abbildung 24: Weltweite Lithium-Handelswerte für 2015 – Rot: Export / Grün: Import [17, p. 235].....	49
Abbildung 25: Weltweite Kobalt-Handelswerte für 2015 – Rot: Export / Grün: Import [17, p. 235].....	50
Abbildung 26: Fahrprofil des PKW-Testzyklus NEFZ, bestehend aus vier Stadtzyklen und einem außerstädtischen Anteil. [50, p. 11]	52
Abbildung 27: Fahrprofil des PKW-Testzyklus WLTC, bestehend aus vier Stadtzyklen und einem außerstädtischen Anteil [50, p. 14].	53
Abbildung 28: Pfad für die Bereitstellung der elektrischen Energie [54, p. 13]. - eigene Darstellung	57
Abbildung 29: Zusammengefasste Darstellung der Energie- und Treibhausemissionszahlen europäischen Stromproduktion von 2009 [55]. – Eigene Darstellung. .	59

Abbildung 30: Herstellungspfad für die Treibstoffproduktion [54, p. 20]. – eigene Darstellung.....	61
Abbildung 31: Auswirkung einer marginalen Reduktion der Benzin-Produktion [54]. – eigene Darstellung.....	64
Abbildung 32: Zusammengefasste Darstellung der Energie- und Treibhausemissionszahlen der erdölbasierten Kraftstofferzeugung [56]. – Eigene Darstellung	65
Abbildung 33: WTW CO ₂ Emissionen durch leichte Nutzfahrzeuge unterschiedlicher Antriebstechnologien für verschiedene Länder/Regionen: RTS und 2DS, 2015 bis 2030 [5, p. 26].	68
Abbildung 34: Unterschied zwischen WTW und LCA [59, p. 6]	69
Abbildung 35: Gesammelter Gesamtenergieverbrauch pro Wh Speicher (Batteriepack) für die in Peters et al. (2016) betrachteten Studien, T-D: Top-Down, B-U: Bottom Up, N/A: Nicht angegeben. [60]	71
Abbildung 36: Gesammelte THG-Emissionen pro Wh Speicher (Batteriepack) für die in Peters et al. (2016) betrachteten Studien, T-D: Top-Down, B-U: Bottom Up, N/A: Nicht angegeben [60].	72
Abbildung 37: Vereinfachtes Flussdiagramm der Batteriekomponenten [1, p. 7].	73
Abbildung 38: Emittierte THG durch die Batterieproduktion in Abhängigkeit der Stromproduktion [1, p. 19].	75
Abbildung 39: GWP des LithoRec II Recyclingverfahren [63, p. 29].	79
Abbildung 40: Energiebedarf des LithoRec II Recyclingverfahren [63, p. 35].	79
Abbildung 41: Kumulierte EV Verkaufszahlen und Second-Life Batterien in Deutschland. [62, p. 30].	81
Abbildung 42: THG-Emissionen pro gefahrenem Kilometer für unterschiedliche Fahrzeugtypen [59]. – eigene Darstellung.....	83
Abbildung 43: THG-Emissionen über die Lebensdauer von verschiedenen Fahrzeugtypen [51, p. 4].	85
Abbildung 44: THG-Emissionen über die Lebensdauer von verschiedenen Fahrzeugtypen abhängig von der Stromproduktion [51, p. 5].	88
Abbildung 45: Energetischer Endverbrauch an elektrischer Energie in der Europäischen Union.	92
Abbildung 46: Anzahl der PKW in den NUTS 2 Ebenen.	94
Abbildung 47: Jährliche PKW – Kilometerleistung in Mrd. Kilometer je NUTS 2 Ebene.	95
Abbildung 48: Gefahrene PKW Kilometer pro Quadratkilometer Nutzfläche – lineare Klassifizierung.	96
Abbildung 49: Gefahrene PKW Kilometer pro Quadratkilometer Nutzfläche – nichtlineare Klassifizierung.	97
Abbildung 50: Anzahl der Elektrofahrzeuge für das 2DS in 2030.	98
Abbildung 51: Jährlicher Strombedarf durch die Elektromobilität für das 2DS im Jahr 2030.	99
Abbildung 52: Änderung des Gesamtstrombedarfs beim 2DS für 2030.	100
Abbildung 53: Änderung des Gesamtstrombedarfs bei 100 % Elektromobilität.	101

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakteristiken von LCO [20].....	24
Tabelle 2: Charakteristiken von NMC [20].....	24
Tabelle 3: Charakteristiken von NCA [20].....	25
Tabelle 4: Charakteristiken von LFP [20].....	25
Tabelle 5: Charakteristiken von LMO [20].	26
Tabelle 6: Charakteristiken von LTO [20].	26
Tabelle 7: Meist verkaufte EV in 2016 inkl. verwendeter Batteriechemie [34, p. 8].	36
Tabelle 8: Ladebetriebsarten laut IEC 61851-1 [40, p. 28].	44
Tabelle 9: Spezifikationen der Schnittstellenarten [40, p. 35].	45
Tabelle 10: Auszug aus den Simulationsergebnissen des TTW Report für 2010 [53, pp. 36,38].	56
Tabelle 11: Auszug aus den Simulationsergebnissen des TTW Report für 2020+. [53, pp. 46,49]	56
Tabelle 12: Anteil der Primärenergieträger am EU-Mix [54, p. 69].	58
Tabelle 13: Zusammengefasste Werte für Energieaufwand und THG-Emissionen unterschiedlicher Stromerzeugungspfade [56, p. 21].	61
Tabelle 14: Geschätzte Emissionen durch die Rohölproduktion in der OECD EU für 2011 [54, p. 22].	62
Tabelle 15: THG-Emissionen und Energiebedarf bei der Rohölproduktion [54, p. 26].	63
Tabelle 16: Emissionen durch die Treibstoffraffination [57, p. 12].	64
Tabelle 17: Auszug aus den zusammengefassten Ergebnissen des WTW Report für 2010 [58, pp. 5,35,36].	67
Tabelle 18: Auszug aus den zusammengefassten Ergebnissen des WTW Report für 2020+ [58, pp. 5,35,36].	67
Tabelle 19: Auszug aus den gesammelten Ergebnisse der THG-Emissionen der von Romare und Dahllöf (2017) untersuchten Studien [34, p. 36].	78
Tabelle 20: Parameter der verschiedenen Fahrzeugsegmente [51, p. 3].	83
Tabelle 21: Szenarien für die Ladestromproduktion für BEVs [51, p. 5].	87
Tabelle 22: Zyklenzahlen der Referenzfahrzeuge von Ellingsen et al. (2016) bis zum Erreichen einer Kilometerleistung von 180 000 km.....	89
Tabelle 23: Länderspezifische Daten für die Ermittlung des regionalen Strombedarfs durch die Elektromobilität in 2030 im Falle des 2DS.....	93
Tabelle 24: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.....	113
Tabelle 25: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.....	114
Tabelle 26: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.....	115
Tabelle 27: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.....	116

Tabelle 28: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.....	117
Tabelle 29: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.....	118

7 Anhang

Land	NUTS-ID	Anzahl der PKW in 2014	jährliche PKW-Kilometer in Mio.	Fläche in km ²	Mio. PKW-Kilometer pro km ²	Bevölkerung mit 1. Jänner 2017	Anteil der Gesamtbevölkerung in %	Annahme für Stromverbrauch 2016 in GWh	Gewichtungsfaktor nach ZDS	Anzahl der Fahrzeuge nach Gewichtung	Anzahl der Elektrofahrzeuge nach ZDS in 2030	Gefahrne elektrische Kilometer nach ZDS in 2030 in Mio.	Energiebedarf bei ZDS in 2030 in GWh	Anteil des Strombedarfs bei ZDS in 2030 in %	Energiebedarf 100 % Elektromobilität in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 100% Elektromobilität in %
Österreich	AT11	184.322	2.600	3.962	0,7	291.942	3,3	2.058	0,18	33.178	22.951	324	55	2,7	442	21,5
	AT12	1.025.527	14.467	19.186	0,8	1.665.753	19,0	11.744	0,18	184.595	127.694	1.801	306	2,6	2.459	20,9
	AT13	683.258	9.638	415	23,2	1.867.582	21,3	13.167	0,18	122.986	85.077	1.200	204	1,5	1.639	12,4
	AT21	341.909	4.823	9.538	0,5	561.077	6,4	3.956	0,18	61.544	42.573	601	102	2,6	820	20,7
	AT22	714.567	10.080	16.401	0,6	1.237.298	14,1	8.723	0,18	128.622	88.975	1.255	213	2,4	1.714	19,6
	AT31	873.537	12.323	11.980	1,0	1.465.045	16,7	10.329	0,18	157.237	108.769	1.534	261	2,5	2.095	20,3
	AT32	293.745	4.144	7.156	0,6	549.263	6,3	3.873	0,18	52.874	36.576	516	88	2,3	704	18,2
	AT33	379.058	5.347	12.640	0,4	746.153	8,5	5.261	0,18	68.230	47.199	666	113	2,2	909	17,3
	AT34	198.998	2.807	2.601	1,1	388.752	4,4	2.741	0,18	35.820	24.778	350	59	2,2	477	17,4
Belgien	BE10	513.529	7.214	161	44,8	1.199.095	10,6	8.646	0,18	92.435	63.943	898	153	1,8	1.226	14,2
	BE21	889.323	12.493	2.867	4,4	1.838.863	16,2	13.259	0,18	160.078	110.735	1.556	264	2,0	2.124	16,0
	BE22	453.684	6.373	2.422	2,6	869.664	7,7	6.270	0,18	81.663	56.491	794	135	2,2	1.083	17,3
	BE23	703.586	9.884	2.982	3,3	1.498.483	13,2	10.804	0,18	126.645	87.608	1.231	209	1,9	1.680	15,6
	BE24	683.688	9.604	2.106	4,6	1.130.644	10,0	8.152	0,18	123.064	85.130	1.196	203	2,5	1.633	20,0
	BE25	590.128	8.290	3.144	2,6	1.188.407	10,5	8.569	0,18	106.223	73.480	1.032	175	2,0	1.409	16,4
	BE31	203.214	2.855	1.091	2,6	399.735	3,5	2.882	0,18	36.579	25.303	355	60	2,1	485	16,8
	BE32	626.126	8.796	3.786	2,3	1.342.053	11,8	9.676	0,18	112.703	77.963	1.095	186	1,9	1.495	15,5
	BE33	514.258	7.224	3.862	1,9	1.106.039	9,7	7.975	0,18	92.566	64.033	900	153	1,9	1.228	15,4
	BE34	137.210	1.927	4.440	0,4	284.617	2,5	2.052	0,18	24.698	17.085	240	41	2,0	328	16,0
BE35	240.753	3.382	3.666	0,9	494.127	4,4	3.563	0,18	43.336	29.978	421	72	2,0	575	16,1	
Bulgarien	BG31	340.679	4.088	19.047	0,2	769.623	10,8	3.132	0,18	61.322	42.420	509	87	2,8	695	22,2
	BG32	359.490	4.314	14.667	0,3	805.441	11,3	3.277	0,18	64.708	44.762	537	91	2,8	733	22,4
	BG33	397.261	4.767	14.645	0,3	939.262	13,2	3.822	0,18	71.507	49.465	594	101	2,6	810	21,2
	BG34	384.718	4.616	19.664	0,2	1.046.125	14,7	4.257	0,18	69.249	47.904	575	98	2,3	785	18,4
	BG41	1.006.625	12.079	20.040	0,6	2.115.344	29,8	8.608	0,18	181.193	125.341	1.504	256	3,0	2.053	23,9
	BG42	525.090	6.301	22.307	0,3	1.426.064	20,1	5.803	0,18	94.516	65.382	785	133	2,3	1.071	18,5
Schweiz	CH01	822.262	10.435	8.719	1,2	1.613.522	19,2	11.013	0,18	148.007	102.385	1.299	221	2,0	1.774	15,9
	CH02	971.268	12.326	10.062	1,2	1.859.557	22,1	12.863	0,18	174.828	120.938	1.535	261	2,0	2.095	16,3
	CH03	581.847	7.384	1.959	3,8	1.142.156	13,6	7.900	0,18	104.732	72.449	919	156	2,0	1.255	15,9
	CH04	709.008	8.998	1.729	5,2	1.487.969	17,7	10.292	0,18	127.621	88.283	1.120	190	1,9	1.530	14,9
	CH05	641.547	8.141	11.527	0,7	1.162.684	13,8	8.042	0,18	115.478	79.883	1.014	172	2,1	1.384	17,2
	CH06	439.719	5.580	4.483	1,2	799.287	9,5	5.529	0,18	79.149	54.752	695	118	2,1	949	17,2
	CH07	218.839	2.777	2.812	1,0	354.375	4,2	2.451	0,18	39.391	27.249	346	59	2,4	472	19,3
Zypern	CY00	478.492	5.742	9.251	0,6	854.802	100,0	4.399	0,18	86.129	59.580	715	122	2,8	976	22,2
Tschechien	CZ01	723.031	8.676	496	17,5	1.280.508	12,1	6.785	0,18	130.146	90.029	1.080	184	2,7	1.475	21,7
	CZ02	629.390	7.552	11.016	0,7	1.338.982	12,7	7.094	0,18	113.290	78.369	940	160	2,3	1.284	18,1
	CZ03	603.570	7.243	17.618	0,4	1.217.411	11,5	6.450	0,18	108.643	75.154	902	153	2,4	1.231	19,1
	CZ04	488.842	5.866	8.649	0,7	1.118.126	10,6	5.924	0,18	87.992	60.869	730	124	2,1	997	16,8
	CZ05	683.013	8.196	12.441	0,7	1.508.527	14,3	7.993	0,18	122.942	85.046	1.021	173	2,2	1.393	17,4
	CZ06	735.559	8.826	13.991	0,6	1.687.764	16,0	8.942	0,18	132.401	91.589	1.099	187	2,1	1.500	16,8
	CZ07	494.025	5.928	9.230	0,6	1.217.623	11,5	6.451	0,18	88.925	61.514	738	125	1,9	1.008	15,6
	CZ08	475.956	5.711	5.427	1,1	1.209.879	11,4	6.410	0,18	85.672	59.264	711	121	1,9	971	15,1
Deutschland	DE11	2.311.336	27.735	10.557	2,6	4.098.278	5,0	25.695	0,25	577.834	399.720	4.797	815	3,2	4.715	18,4
	DE12	1.501.653	18.019	6.919	2,6	2.779.314	3,4	17.425	0,25	375.413	259.694	3.116	530	3,0	3.063	17,6
	DE13	1.214.852	14.578	9.357	1,6	2.239.734	2,7	14.042	0,25	303.713	210.095	2.521	429	3,1	2.478	17,6
	DE14	1.042.564	12.510	8.918	1,4	1.834.567	2,2	11.502	0,25	260.641	180.300	2.164	368	3,2	2.127	18,5
	DE21	2.528.790	30.345	17.531	1,7	4.633.323	5,6	29.049	0,25	632.198	437.326	5.248	892	3,1	5.159	17,8
	DE22	1.18.717	8.624	10.329	0,8	1.219.397	1,5	7.645	0,25	179.679	124.294	1.491	254	3,3	1.466	19,2
	DE23	649.701	7.796	9.690	0,8	1.098.378	1,3	6.886	0,25	162.425	112.359	1.348	229	3,3	1.325	19,2
	DE24	636.721	7.640	7.231	1,1	1.062.394	1,3	6.661	0,25	159.180	110.114	1.321	225	3,4	1.299	19,5
	DE25	944.720	11.336	7.245	1,6	1.750.059	2,1	10.972	0,25	236.180	163.379	1.960	333	3,0	1.927	17,6
	DE26	785.124	9.421	8.531	1,1	1.309.209	1,6	8.208	0,25	196.281	135.778	1.629	277	3,4	1.602	19,5
	DE27	1.047.320	12.567	9.993	1,3	1.857.991	2,3	11.649	0,25	261.830	181.122	2.173	369	3,2	2.136	18,3
	DE30	1.154.106	13.849	892	15,5	3.574.830	4,3	22.413	0,25	288.527	199.590	2.395	407	1,8	2.354	10,5
	DE40	1.343.315	16.119	29.654	0,5	2.494.648	3,0	15.640	0,25	335.829	232.311	2.788	474	3,0	2.740	17,5
	DE50	276.270	3.315	419	7,9	678.753	0,8	4.256	0,25	69.068	47.778	573	97	2,3	564	13,2
	DE60	742.320	8.908	755	11,8	1.810.438	2,2	11.351	0,25	185.580	128.376	1.540	262	2,3	1.514	13,3
	DE71	2.159.218	25.910	7.445	3,5	3.951.234	4,8	24.773	0,25	539.805	373.413	4.481	762	3,1	4.405	17,8

Tabelle 24: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.

Land	NUTS-ID	Anzahl der PKW in 2014	jährliche PKW-Kilometer in Mio.	Fläche in km ²	Mio. PKW-Kilometer pro km ²	Bevölkerung mit 1. Jänner 2017	Anteil der Gesamtbevölkerung in %	Annahme für Stromverbrauch 2016 in GWh	Gewichtungsfaktor nach ZDS	Anzahl der Fahrzeuge nach Gewichtung	Anzahl der Elektrofahrzeuge nach ZDS in 2030	Gefahrne elektrische Kilometer nach ZDS in 2030 in Mio.	Energiebedarf bei ZDS in 2030 in GWh	Anteil des Strombedarfs bei ZDS in 2030 in %	Energiebedarf 100 % Elektromobilität in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 100% Elektromobilität in %
Deutschland	DE72	594.519	7.134	5.381	1,3	1.043.643	1,3	6.543	0,25	148.630	102.815	1.234	210	3,2	1.213	18,5
	DE73	687.669	8.252	8.289	1,0	1.218.211	1,5	7.638	0,25	171.917	118.925	1.427	243	3,2	1.403	18,4
	DE80	821.255	9.855	23.213	0,4	1.610.674	2,0	10.098	0,25	205.314	142.027	1.704	290	2,9	1.675	16,6
	DE91	935.365	11.224	8.100	1,4	1.595.609	1,9	10.004	0,25	233.841	161.761	1.941	330	3,3	1.908	19,1
	DE92	1.108.287	13.299	9.048	1,5	2.139.976	2,6	13.417	0,25	277.072	191.666	2.300	391	2,9	2.261	16,9
	DE93	976.357	11.716	15.496	0,8	1.703.945	2,1	10.683	0,25	244.089	168.850	2.026	344	3,2	1.992	18,6
	DE94	1.363.392	16.360	14.971	1,1	2.506.155	3,0	15.713	0,25	340.848	235.783	2.829	481	3,1	2.781	17,7
	DEA1	2.645.643	31.747	5.292	6,0	5.190.790	6,3	32.544	0,25	661.411	457.534	5.490	933	2,9	5.397	16,6
	DEA2	2.298.051	27.576	7.364	3,7	4.439.416	5,4	27.833	0,25	574.513	397.422	4.769	811	2,9	4.688	16,8
	DEA3	1.362.748	16.353	6.917	2,4	2.619.376	3,2	16.422	0,25	340.687	235.672	2.828	481	2,9	2.780	16,9
	DEA4	1.140.167	13.682	6.525	2,1	2.054.205	2,5	12.879	0,25	285.042	197.179	2.366	402	3,1	2.326	18,1
	DEA5	1.908.059	22.896	8.012	2,9	3.586.313	4,3	22.485	0,25	477.015	329.977	3.960	673	3,0	3.892	17,3
	DEB1	885.785	10.629	8.073	1,3	1.492.187	1,8	9.355	0,25	221.446	153.187	1.838	312	3,3	1.807	19,3
	DEB2	303.238	3.639	4.924	0,7	528.728	0,6	3.315	0,25	75.810	52.442	629	107	3,2	619	18,7
	DEB3	1.154.434	13.853	6.851	2,0	2.045.138	2,5	12.822	0,25	288.609	199.646	2.396	407	3,2	2.355	18,4
	DEC0	603.331	7.240	2.569	2,8	996.651	1,2	6.249	0,25	150.833	104.339	1.252	213	3,4	1.231	19,7
	DED2	804.625	9.655	7.931	1,2	1.600.155	1,9	10.032	0,25	201.156	139.151	1.670	284	2,8	1.641	16,4
	DED4	816.894	9.802	6.524	1,5	1.454.144	1,8	9.117	0,25	204.224	141.273	1.695	288	3,2	1.666	18,3
	DEDS	465.309	5.584	3.965	1,4	1.027.484	1,2	6.442	0,25	116.327	80.470	966	164	2,5	949	14,7
	DEE0	1.188.376	14.260	20.452	0,7	2.236.252	2,7	14.020	0,25	297.094	205.516	2.466	419	3,0	2.424	17,3
DEF0	1.534.917	18.418	15.802	1,2	2.881.926	3,5	18.068	0,25	383.729	265.447	3.185	541	3,0	3.131	17,3	
DEG0	1.161.592	13.939	16.202	0,9	2.158.128	2,6	13.531	0,25	290.398	200.884	2.411	410	3,0	2.370	17,5	
Dänemark	DK01	633.794	7.605	2.559	3,0	1.807.404	31,4	9.795	0,18	114.083	78.917	947	161	1,6	1.293	13,2
	DK02	355.073	4.261	7.223	0,6	832.553	14,5	4.512	0,18	63.913	44.212	531	90	2,0	724	16,1
	DK03	530.174	6.362	12.256	0,5	1.217.224	21,2	6.596	0,18	95.431	66.015	792	135	2,0	1.082	16,4
	DK04	555.244	6.663	13.006	0,5	1.304.253	22,7	7.068	0,18	99.944	69.137	830	141	2,0	1.133	16,0
	DK05	251.380	3.016	7.879	0,4	587.335	10,2	3.183	0,18	45.248	31.301	376	64	2,0	513	16,1
Estland	EE00	652.950	8.212	45.227	0,2	1.315.635	100,0	7.299	0,18	117.531	81.303	1.023	174	2,4	1.396	19,1
Griechenland	EL30	2.766.696	33.199	3.814	8,7	3.773.559	35,0	18.700	0,18	498.005	344.498	4.134	703	3,8	5.644	30,2
	EL41	59.497	714	3.854	0,2	203.700	1,9	1.009	0,18	10.709	7.408	89	15	1,5	121	12,0
	EL42	113.413	1.361	5.305	0,3	338.383	3,1	1.677	0,18	20.414	14.122	169	29	1,7	231	13,8
	EL43	259.218	3.111	8.340	0,4	632.674	5,9	3.135	0,18	46.659	32.277	387	66	2,1	529	16,9
	EL51	203.742	2.445	14.179	0,2	602.799	5,6	2.987	0,18	36.674	25.369	304	52	1,7	416	13,9
	EL52	746.621	8.959	19.166	0,5	1.880.122	17,5	9.317	0,18	134.392	92.966	1.116	190	2,0	1.523	16,3
	EL53	99.455	1.193	9.471	0,1	271.488	2,5	1.345	0,18	17.902	12.384	149	25	1,9	203	15,1
	EL54	113.350	1.360	9.164	0,1	335.250	3,1	1.661	0,18	20.403	14.114	169	29	1,7	231	13,9
	EL61	239.485	2.874	14.051	0,2	725.874	6,7	3.597	0,18	43.107	29.820	358	61	1,7	489	13,6
	EL62	81.635	980	2.306	0,4	205.431	1,9	1.018	0,18	14.694	10.165	122	21	2,0	167	16,4
	EL63	176.823	2.122	11.327	0,2	663.970	6,2	3.290	0,18	31.828	22.017	264	45	1,4	361	11,0
EL64	133.283	1.599	15.561	0,1	555.761	5,2	2.754	0,18	23.991	16.596	199	34	1,2	272	9,9	
EL65	117.655	1.412	15.511	0,1	579.182	5,4	2.870	0,18	21.178	14.650	176	30	1,0	240	8,4	
Spanien	ES11	1.451.890	6.032	29.575	0,2	2.710.216	5,8	13.544	0,18	261.340	180.783	751	128	0,9	1.025	7,6
	ES12	493.570	2.050	10.603	0,2	1.034.302	2,2	5.169	0,18	88.843	61.457	255	43	0,8	349	6,7
	ES13	287.067	1.193	5.327	0,2	581.490	1,2	2.906	0,18	51.672	35.744	148	25	0,9	203	7,0
	ES21	946.694	3.933	7.228	0,5	2.167.323	4,7	10.831	0,18	170.405	117.879	490	83	0,8	669	6,2
	ES22	299.536	1.244	10.390	0,1	640.353	1,4	3.200	0,18	53.916	37.297	155	26	0,8	212	6,6
	ES23	134.699	560	5.045	0,1	312.624	0,7	1.562	0,18	24.246	16.772	70	12	0,8	95	6,1
	ES24	567.011	2.356	47.720	0,0	1.316.072	2,8	6.577	0,18	102.062	70.602	293	50	0,8	400	6,1
	ES30	3.256.265	13.528	8.028	1,7	6.476.838	13,9	32.367	0,18	586.128	405.457	1.684	286	0,9	2.300	7,1
	ES41	1.237.841	5.142	94.227	0,1	2.435.951	5,2	12.173	0,18	222.811	154.131	640	109	0,9	874	7,2
	ES42	979.861	4.071	79.462	0,1	2.040.977	4,4	10.199	0,18	176.375	122.008	507	86	0,8	692	6,8
	ES43	544.636	2.263	41.611	0,1	1.077.525	2,3	5.385	0,18	98.034	67.816	282	48	0,9	385	7,1
	ES51	3.309.596	13.749	32.090	0,4	7.441.284	16,0	37.186	0,18	595.727	412.097	1.712	291	0,8	2.337	6,3
	ES52	2.356.007	9.788	23.257	0,4	4.935.182	10,6	24.663	0,18	424.081	293.360	1.219	207	0,8	1.664	6,7
	ES53	652.297	2.710	4.992	0,5	1.150.962	2,5	5.752	0,18	117.413	81.221	337	57	1,0	461	8,0
ES61	3.736.682	15.523	87.597	0,2	8.408.976	18,1	42.022	0,18	672.603	465.277	1.933	329	0,8	2.639	6,3	

Tabelle 25: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.

Land	NUTS-ID	Anzahl der PKW in 2014	jährliche PKW-Kilometer in Mio.	Fläche in km ²	Mio. PKW-Kilometer pro km ²	Bevölkerung mit 1. Jänner 2017	Anteil der Gesamtbevölkerung in %	Annahme für Stromverbrauch 2016 in GWh	Gewichtungsfaktor nach 2DS	Anzahl der Fahrzeuge nach Gewichtung	Anzahl der Elektrofahrzeuge nach 2DS in 2030	Gefahrene elektrische Kilometer nach 2DS in 2030 in Mio.	Energiebedarf bei 2DS in 2030 in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 2DS in 2030 in %	Energiebedarf 100 % Elektromobilität in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 100% Elektromobilität in %
Spanien	ES62	685.074	2.846	11.314	0,3	1.472.991	3,2	7.361	0,18	123.313	85.303	354	60	0,8	484	6,6
	ES63	40.703	169	20	8,5	85.034	0,2	425	0,18	7.327	5.068	21	4	0,8	29	6,8
	ES64	41.678	173	13	13,3	84.946	0,2	425	0,18	7.502	5.190	22	4	0,9	29	6,9
	ES70	1.008.405	4.189	7.445	0,6	2.154.978	4,6	10.769	0,18	181.513	125.563	522	89	0,8	712	6,6
Finnland	FI19	856.700	12.609	64.763	0,2	1.380.593	25,1	20.278	0,18	154.206	106.673	1.570	267	1,3	2.144	10,6
	FI1B	796.600	11.724	9.568	1,2	1.638.293	29,8	24.063	0,18	143.388	99.189	1.460	248	1,0	1.993	8,3
	FI1C	711.300	10.469	35.378	0,3	1.159.174	21,1	17.025	0,18	128.034	88.568	1.304	222	1,3	1.780	10,5
	FI1D	792.900	11.670	227.150	0,1	1.296.023	23,5	19.035	0,18	142.722	98.729	1.453	247	1,3	1.984	10,4
FI20	22.200	327	1.581	0,2	29.214	0,5	429	0,18	3.996	2.764	41	7	1,6	56	12,9	
Frankreich	FR10	5.217.230	69.416	12.012	5,8	12.193.865	18,8	83.243	0,25	1.304.308	902.262	12.005	2.041	2,5	11.801	14,2
	FR21	675.925	8.993	25.606	0,4	1.334.453	2,1	9.110	0,25	168.981	116.894	1.555	264	2,9	1.529	16,8
	FR22	1.136.218	15.117	19.400	0,8	1.934.171	3,0	13.204	0,25	284.055	196.496	2.614	444	3,4	2.570	19,5
	FR23	989.187	13.161	12.317	1,1	1.865.332	2,9	12.734	0,25	247.297	171.069	2.276	387	3,0	2.237	17,6
	FR24	1.310.215	17.433	39.151	0,4	2.582.302	4,0	17.628	0,25	327.554	226.587	3.015	513	2,9	2.964	16,8
	FR25	735.953	9.792	17.589	0,6	1.477.290	2,3	10.085	0,25	183.988	127.275	1.693	288	2,9	1.665	16,5
	FR26	835.716	11.119	31.582	0,4	1.637.366	2,5	11.178	0,25	208.929	144.528	1.923	327	2,9	1.890	16,9
	FR30	1.940.824	25.823	12.414	2,1	4.087.132	6,3	27.901	0,25	485.206	335.644	4.466	759	2,7	4.390	15,7
	FR41	1.256.409	16.717	23.547	0,7	2.330.674	3,6	15.911	0,25	314.102	217.282	2.891	491	3,1	2.842	17,9
	FR42	1.006.815	13.396	8.280	1,6	1.888.937	2,9	12.895	0,25	251.704	174.117	2.317	394	3,1	2.277	17,7
	FR43	644.725	8.578	16.202	0,5	1.179.900	1,8	8.055	0,25	161.181	111.498	1.483	252	3,1	1.458	18,1
	FR51	1.847.149	24.576	32.082	0,8	3.765.798	5,8	25.708	0,25	461.787	319.444	4.250	723	2,8	4.178	16,3
	FR52	1.694.511	22.546	27.208	0,8	3.323.130	5,1	22.686	0,25	423.628	293.047	3.899	663	2,9	3.833	16,9
	FR53	963.858	12.824	25.810	0,5	1.811.206	2,8	12.364	0,25	240.965	166.688	2.218	377	3,0	2.180	17,6
	FR61	1.802.216	23.979	41.308	0,6	3.422.179	5,3	23.362	0,25	450.554	311.673	4.147	705	3,0	4.076	17,4
	FR62	1.568.999	20.876	45.348	0,5	3.046.465	4,7	20.797	0,25	392.250	271.341	3.610	614	3,0	3.549	17,1
	FR63	385.640	5.131	16.942	0,3	735.908	1,1	5.024	0,25	96.410	66.692	887	151	3,0	872	17,4
	FR71	3.452.459	45.935	43.698	1,1	6.621.564	10,2	45.203	0,25	863.115	597.064	7.944	1.350	3,0	7.809	17,3
FR72	707.597	9.415	26.013	0,4	1.365.263	2,1	9.320	0,25	176.899	122.371	1.628	277	3,0	1.600	17,2	
FR81	1.447.299	19.256	27.376	0,7	2.815.936	4,3	19.223	0,25	361.825	250.294	3.330	566	2,9	3.274	17,0	
FR82	2.725.125	36.258	31.400	1,2	5.047.942	7,8	34.460	0,25	681.281	471.280	6.270	1.066	3,1	6.164	17,9	
FR83	185.857	2.473	8.680	0,3	334.283	0,5	2.282	0,25	46.464	32.142	428	73	3,2	420	18,4	
Kroatien	HR03	541.674	6.721	24.705	0,3	1.387.363	33,4	5.110	0,18	97.501	67.447	837	142	2,8	1.143	22,4
	HR04	932.821	11.574	31.889	0,4	2.766.850	66,6	10.190	0,18	167.908	116.151	1.441	245	2,4	1.968	19,3
Ungarn	HU10	1.030.482	8.434	6.915	1,2	3.000.076	30,6	11.366	0,18	185.487	128.311	1.050	179	1,6	1.434	12,6
	HU21	354.097	2.898	11.085	0,3	1.056.097	10,8	4.001	0,18	63.737	44.091	361	61	1,5	493	12,3
	HU22	347.021	2.840	11.328	0,3	983.251	10,0	3.725	0,18	62.464	43.210	354	60	1,6	483	13,0
	HU23	287.076	2.350	14.197	0,2	894.223	9,1	3.388	0,18	51.674	35.746	293	50	1,5	399	11,8
	HU31	311.187	2.547	13.428	0,2	1.143.902	11,7	4.334	0,18	56.014	38.748	317	54	1,2	433	10,0
	HU32	390.483	3.196	17.723	0,2	1.468.088	15,0	5.562	0,18	70.287	48.621	398	68	1,2	543	9,8
HU33	387.018	3.168	18.335	0,2	1.251.924	12,8	4.743	0,18	69.663	48.190	394	67	1,4	538	11,4	
Irland	IE01	524.060	8.394	33.252	0,3	1.274.988	26,6	6.815	0,18	94.331	65.254	1.045	178	2,6	1.427	20,9
	IE02	1.494.120	23.930	36.545	0,7	3.509.395	73,4	18.759	0,18	268.942	186.042	2.980	507	2,7	4.068	21,7
Italien	ITC1	2.833.499	34.001	25.387	1,3	4.392.526	7,2	20.736	0,18	510.030	352.816	4.234	720	3,5	5.780	27,9
	ITC2	147.147	1.766	3.261	0,5	126.883	0,2	599	0,18	26.486	18.322	220	37	6,2	300	50,1
	ITC3	829.292	9.951	5.416	1,8	1.565.307	2,6	7.389	0,18	149.273	103.260	1.239	211	2,9	1.692	22,9
	ITC4	5.879.632	70.554	23.864	3,0	10.019.166	16,5	47.298	0,18	1.058.334	732.108	8.785	1.493	3,2	11.994	25,4
	ITF1	847.233	10.167	10.833	0,9	1.322.247	2,2	6.242	0,18	152.502	105.494	1.266	215	3,4	1.728	27,7
	ITF2	202.873	2.434	4.461	0,5	310.449	0,5	1.466	0,18	36.517	25.261	303	52	3,5	414	28,2
	ITF3	3.335.372	40.023	13.670	2,9	5.839.084	9,6	27.565	0,18	600.367	415.307	4.984	847	3,1	6.804	24,7
	ITF4	2.247.602	26.970	19.541	1,4	4.063.888	6,7	19.185	0,18	404.568	279.862	3.358	571	3,0	4.585	23,9
	ITF5	357.465	4.289	10.073	0,4	570.365	0,9	2.693	0,18	64.344	44.510	534	91	3,4	729	27,1
	ITF6	1.215.172	14.582	15.222	1,0	1.965.128	3,2	9.277	0,18	218.731	151.308	1.816	309	3,3	2.479	26,7
	ITG1	3.146.197	37.753	25.833	1,5	5.056.641	8,3	23.871	0,18	566.315	391.752	4.701	799	3,3	6.418	26,9
	ITG2	1.005.914	12.071	24.100	0,5	1.653.135	2,7	7.804	0,18	181.065	125.252	1.503	256	3,3	2.052	26,3
ITH1	387.988	4.656	7.398	0,6	524.256	0,9	2.475	0,18	69.838	48.311	580	99	4,0	791	32,0	
ITH2	426.038	5.112	6.207	0,8	538.604	0,9	2.543	0,18	76.687	53.049	637	108	4,3	869	34,2	

Tabelle 26: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.

Land	NUTS-ID	Anzahl der PKW in 2014	jährliche PKW-Kilometer in Mio.	Fläche in km ²	Mio. PKW-Kilometer pro km ²	Bevölkerung mit 1. Jänner 2017	Anteil der Gesamtbevölkerung in %	Annahme für Stromverbrauch 2016 in GWh	Gewichtungsfaktor nach 2DS	Anzahl der Fahrzeuge nach Gewichtung	Anzahl der Elektrofahrzeuge nach 2DS in 2030	Gefahrene elektrische Kilometer nach 2DS in 2030 in Mio.	Energiebedarf bei 2DS in 2030 in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 2DS in 2030 in %	Energiebedarf 100 % Elektromobilität in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 100% Elektromobilität in %
Italien	ITH3	2.983.814	35.805	18.407	1,9	4.907.529	8,1	23.167	0,18	537.087	371.532	4.458	758	3,3	6.087	26,3
	ITH4	769.583	9.235	7.862	1,2	1.217.872	2,0	5.749	0,18	138.525	95.825	1.150	195	3,4	1.570	27,3
	ITH5	2.754.792	33.057	22.453	1,5	4.448.841	7,3	21.002	0,18	495.863	343.016	4.116	700	3,3	5.620	26,8
	IT11	2.378.924	28.546	22.988	1,2	3.742.437	6,2	17.667	0,18	428.206	296.214	3.554	604	3,4	4.853	27,5
	IT12	613.739	7.365	8.464	0,9	888.908	1,5	4.196	0,18	110.473	76.420	917	156	3,7	1.252	29,8
	IT3	993.976	11.927	9.401	1,3	1.538.055	2,5	7.261	0,18	178.916	123.766	1.485	252	3,5	2.028	27,9
IT14	3.707.456	44.488	17.232	2,6	5.898.124	9,7	27.844	0,18	667.342	461.637	5.539	942	3,4	7.563	27,2	
Litauen	LT00	1.205.668	14.468	65.286	0,2	2.847.904	100,0	9.750	0,18	217.020	150.125	1.801	306	3,1	2.459	25,2
Luxemburg	LU00	363.247	4.359	2.586	1,7	590.667	100,0	6.367	0,18	65.384	45.230	543	92	1,4	741	11,6
Lettland	LV00	657.799	7.893	64.573	0,1	1.950.116	100,0	6.482	0,18	118.404	81.906	983	167	2,6	1.342	20,7
Malta	MT00	265.950	3.191	315	10,1	460.297	100,0	2.114	0,18	47.871	33.115	397	68	3,2	543	25,7
Niederlande	NL11	259.921	3.378	2.960	1,1	583.581	3,4	3.609	0,25	64.980	44.950	584	99	2,8	574	15,9
	NL12	308.085	4.004	5.749	0,7	646.874	3,8	4.000	0,25	77.021	53.280	692	118	2,9	681	17,0
	NL13	250.614	3.257	2.680	1,2	491.792	2,9	3.041	0,25	62.654	43.341	563	96	3,1	554	18,2
	NL21	539.981	7.018	3.421	2,1	1.147.687	6,7	7.097	0,25	134.995	93.384	1.214	206	2,9	1.193	16,8
	NL22	961.866	12.501	5.136	2,4	2.047.901	12,0	12.664	0,25	240.467	166.344	2.162	368	2,9	2.125	16,8
	NL23	323.255	4.201	2.412	1,7	407.818	2,4	2.522	0,25	80.814	55.903	727	124	4,9	714	28,3
	NL31	632.138	8.215	1.449	5,7	1.284.504	7,5	7.943	0,25	158.035	109.321	1.421	242	3,0	1.397	17,6
	NL32	1.140.432	14.821	4.091	3,6	2.809.483	16,4	17.373	0,25	285.108	197.225	2.563	436	2,5	2.520	14,5
	NL33	1.500.508	19.501	3.418	5,7	3.650.222	21,4	22.572	0,25	375.127	259.496	3.373	573	2,5	3.315	14,7
	NL34	192.767	2.505	2.933	0,9	381.568	2,2	2.360	0,25	48.192	33.337	433	74	3,1	426	18,1
	NL41	1.309.461	17.018	5.082	3,3	2.512.531	14,7	15.537	0,25	327.365	226.457	2.943	500	3,2	2.893	18,6
NL42	560.055	7.279	2.209	3,3	1.117.546	6,5	6.911	0,25	140.014	96.855	1.259	214	3,1	1.237	17,9	
Norwegen	NO01	589.477	7.859	5.372	1,5	1.271.127	24,2	27.472	0,25	147.369	101.943	1.359	231	0,8	1.336	4,9
	NO02	217.667	2.902	52.590	0,1	385.669	7,3	8.335	0,25	54.417	37.643	502	85	1,0	493	5,9
	NO03	504.694	6.729	36.613	0,2	992.962	18,9	21.460	0,25	126.174	87.281	1.164	198	0,9	1.144	5,3
	NO04	363.153	4.842	25.812	0,2	772.813	14,7	16.702	0,25	90.788	62.803	837	142	0,9	823	4,9
	NO05	413.099	5.508	49.156	0,1	896.503	17,0	19.376	0,25	103.275	71.441	952	162	0,8	936	4,8
	NO06	216.425	2.885	41.254	0,1	454.596	8,6	9.825	0,25	54.106	37.428	499	85	0,9	491	5,0
	NO07	232.514	3.100	112.975	0,0	484.647	9,2	10.474	0,25	58.129	40.211	536	91	0,9	527	5,0
Polen	PL11	1.314.040	11.527	18.219	0,6	2.471.620	6,5	8.646	0,18	236.527	163.619	1.435	244	2,8	1.960	22,7
	PL12	3.042.527	26.689	35.558	0,8	5.341.484	14,1	18.686	0,18	547.655	378.843	3.323	565	3,0	4.537	24,3
	PL21	1.663.398	14.592	15.183	1,0	3.339.803	8,8	11.683	0,18	299.412	207.120	1.817	309	2,6	2.481	21,2
	PL22	2.330.091	20.440	12.333	1,7	4.510.528	11,9	15.779	0,18	419.416	290.134	2.545	433	2,7	3.475	22,0
	PL31	1.059.870	9.297	25.122	0,4	2.112.787	5,6	7.391	0,18	190.777	131.971	1.158	197	2,7	1.581	21,4
	PL32	983.443	8.627	17.846	0,5	2.084.722	5,5	7.293	0,18	177.020	122.454	1.074	183	2,5	1.467	20,1
	PL33	609.767	5.349	11.711	0,5	1.237.518	3,3	4.329	0,18	109.758	75.926	666	113	2,6	909	21,0
	PL34	533.088	4.676	20.187	0,2	1.156.947	3,0	4.047	0,18	95.956	66.378	582	99	2,4	795	19,6
	PL41	2.016.910	17.693	29.826	0,6	3.457.473	9,1	12.095	0,18	363.044	251.137	2.203	375	3,1	3.008	24,9
	PL42	841.273	7.380	22.892	0,3	1.681.246	4,4	5.881	0,18	151.429	104.752	919	156	2,7	1.255	21,3
	PL43	558.162	4.896	13.988	0,4	1.004.892	2,6	3.515	0,18	100.469	69.500	610	104	2,9	832	23,7
	PL51	1.552.886	13.622	19.947	0,7	2.866.218	7,5	10.027	0,18	279.519	193.359	1.696	288	2,9	2.316	23,1
	PL52	565.010	4.956	9.412	0,5	950.710	2,5	3.326	0,18	101.702	70.353	617	105	3,2	843	25,3
	PL61	1.066.512	9.356	17.972	0,5	2.060.575	5,4	7.208	0,18	191.972	132.798	1.165	198	2,7	1.590	22,1
	PL62	673.080	5.904	24.173	0,2	1.410.641	3,7	4.935	0,18	121.154	83.809	735	125	2,5	1.004	20,3
PL63	1.193.806	10.472	18.310	0,6	2.285.800	6,0	7.996	0,18	214.885	148.648	1.304	222	2,8	1.780	22,3	
Rumänien	RO11	638.230	4.765	34.161	0,1	2.568.730	13,1	5.656	0,18	114.881	79.470	593	101	1,8	810	14,3
	RO12	587.201	4.384	34.100	0,1	2.332.935	11,9	5.137	0,18	105.696	73.116	546	93	1,8	745	14,5
	RO21	578.730	4.320	36.850	0,1	3.239.612	16,5	7.134	0,18	104.171	72.061	538	91	1,3	734	10,3
	RO22	554.121	4.137	35.762	0,1	2.446.734	12,5	5.388	0,18	99.742	68.997	515	88	1,6	703	13,1
	RO31	615.368	4.594	34.453	0,1	3.003.349	15,3	6.613	0,18	110.766	76.623	572	97	1,5	781	11,8
	RO32	1.018.209	7.601	1.821	4,2	2.287.347	11,6	5.037	0,18	183.278	126.783	946	161	3,2	1.292	25,7
	RO41	436.192	3.256	29.212	0,1	1.973.140	10,0	4.345	0,18	78.515	54.313	405	69	1,6	554	12,7
RO42	479.513	3.580	32.033	0,1	1.792.503	9,1	3.947	0,18	86.312	59.707	446	76	1,9	609	15,4	
Schweden	SE11	863.835	12.159	6.779	1,8	2.269.060	22,7	28.944	0,25	215.959	149.391	2.103	357	1,2	2.067	7,1
	SE12	770.499	10.845	41.204	0,3	1.664.145	16,6	21.227	0,25	192.625	133.249	1.876	319	1,5	1.844	8,7

Tabelle 27: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.

Land	NUTS-ID	Anzahl der PKW in 2014	jährliche PKW-Kilometer in Mio.	Fläche in km ²	Mio. PKW-Kilometer pro km ²	Bevölkerung mit 1. Jänner 2017	Anteil der Gesamtbevölkerung in %	Annahme für Stromverbrauch 2016 in GWh	Gewichtungsfaktor nach 2DS	Anzahl der Fahrzeuge nach Gewichtung	Anzahl der Elektrofahrzeuge nach 2DS in 2030	Gefahrene elektrische Kilometer nach 2DS in 2030 in Mio.	Energiebedarf bei 2DS in 2030 in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 2DS in 2030 in %	Energiebedarf 100 % Elektromobilität in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 100% Elektromobilität in %
Schweden	SE21	433.348	6.099	35.382	0,2	847.667	8,5	10.813	0,25	108.337	74.943	1.055	179	1,7	1.037	9,6
	SE22	685.456	9.648	14.341	0,7	1.483.018	14,8	18.917	0,25	171.364	118.542	1.669	284	1,5	1.640	8,7
	SE23	906.594	12.761	30.934	0,4	1.992.116	19,9	25.411	0,25	226.649	156.785	2.207	375	1,5	2.169	8,5
	SE31	453.655	6.385	69.148	0,1	848.451	8,5	10.823	0,25	113.414	78.455	1.104	188	1,7	1.086	10,0
	SE32	201.283	2.833	76.709	0,0	374.245	3,7	4.774	0,25	50.321	34.810	490	83	1,7	482	10,1
SE33	270.041	3.801	164.077	0,0	516.451	5,2	6.588	0,25	67.510	46.701	657	112	1,7	646	9,8	
Slowenien	SI03	559.633	6.715	12.433	0,5	1.091.159	52,8	6.880	0,18	100.734	69.683	836	142	2,1	1.142	16,6
	SI04	508.729	6.105	7.840	0,8	974.736	47,2	6.145	0,18	91.571	63.345	760	129	2,1	1.038	16,9
Slowakei	SK01	343.193	4.118	2.053	2,0	641.892	11,8	2.951	0,18	61.775	42.733	513	87	3,0	700	23,7
	SK02	695.502	8.346	14.992	0,6	1.830.751	33,7	8.416	0,18	125.190	86.601	1.039	177	2,1	1.419	16,9
	SK03	438.566	5.263	16.263	0,3	1.342.287	24,7	6.171	0,18	78.942	54.608	655	111	1,8	895	14,5
	SK04	471.794	5.661	15.727	0,4	1.620.413	29,8	7.449	0,18	84.923	58.746	705	120	1,6	962	12,9
Türkei	TR10	2.274.368	27.292	5.315	5,1	14.804.116	18,5	42.363	0,18	409.386	283.195	3.398	578	1,4	4.640	11,0
	TR21	212.083	2.545	18.740	0,1	1.726.260	2,2	4.940	0,18	38.175	26.408	317	54	1,1	433	8,8
	TR22	234.451	2.813	24.423	0,1	1.715.969	2,1	4.910	0,18	42.201	29.193	350	60	1,2	478	9,7
	TR31	612.020	7.344	12.016	0,6	4.223.545	5,3	12.086	0,18	110.164	76.206	914	155	1,3	1.248	10,3
	TR32	465.021	5.580	32.658	0,2	2.997.720	3,8	8.578	0,18	83.704	57.903	695	118	1,4	949	11,1
	TR33	394.031	4.728	45.324	0,1	3.043.846	3,8	8.710	0,18	70.926	49.063	589	100	1,1	804	9,2
	TR41	523.946	6.287	29.095	0,2	3.964.535	5,0	11.345	0,18	94.310	65.240	783	133	1,2	1.069	9,4
	TR42	406.445	4.877	20.272	0,2	3.719.652	4,7	10.644	0,18	73.160	50.609	607	103	1,0	829	7,8
	TR51	1.147.113	13.765	25.402	0,5	5.346.518	6,7	15.300	0,18	206.480	142.834	1.714	291	1,9	2.340	15,3
	TR52	319.455	3.833	49.682	0,1	2.406.913	3,0	6.888	0,18	57.502	39.777	477	81	1,2	652	9,5
	TR61	506.971	6.083	36.797	0,2	3.017.280	3,8	8.634	0,18	91.255	63.126	757	129	1,5	1.034	12,0
	TR62	478.924	5.747	29.558	0,2	3.975.522	5,0	11.376	0,18	86.206	59.634	716	122	1,1	977	8,6
	TR63	327.436	3.929	23.484	0,2	3.189.974	4,0	9.128	0,18	58.938	40.771	489	83	0,9	668	7,3
	TR71	195.216	2.343	31.823	0,1	1.546.995	1,9	4.427	0,18	35.139	24.308	292	50	1,1	398	9,0
	TR72	301.701	3.620	59.751	0,1	2.401.245	3,0	6.871	0,18	54.306	37.567	451	77	1,1	615	9,0
	TR81	137.989	1.656	9.499	0,2	1.032.260	1,3	2.954	0,18	24.838	17.182	206	35	1,2	281	9,5
	TR82	97.109	1.165	26.466	0,0	766.303	1,0	2.193	0,18	17.480	12.092	145	25	1,1	198	9,0
	TR83	308.843	3.706	37.937	0,1	2.752.803	3,4	7.877	0,18	55.592	38.456	461	78	1,0	630	8,0
	TR90	211.474	2.538	35.174	0,1	2.645.584	3,3	7.571	0,18	38.065	26.332	316	54	0,7	431	5,7
	TRA1	78.620	943	40.798	0,0	1.078.207	1,4	3.085	0,18	14.152	9.789	117	20	0,6	160	5,2
	TRA2	29.460	354	30.193	0,0	1.123.161	1,4	3.214	0,18	5.303	3.668	44	7	0,2	60	1,9
	TRB1	132.556	1.591	37.323	0,0	1.711.847	2,1	4.899	0,18	23.860	16.505	198	34	0,7	270	5,5
	TRB2	43.863	526	41.755	0,0	2.115.729	2,7	6.054	0,18	7.895	5.462	66	11	0,2	89	1,5
	TRC1	234.086	2.809	15.879	0,2	2.715.553	3,4	7.771	0,18	42.135	29.147	350	59	0,8	478	6,1
TRC2	140.037	1.680	34.540	0,0	3.613.746	4,5	10.341	0,18	25.207	17.437	209	36	0,3	286	2,8	
TRC3	44.697	536	26.090	0,0	2.179.588	2,7	6.237	0,18	8.045	5.565	67	11	0,2	91	1,5	
Vereinigtes Königreich	UKC1	514.866	6.768	3.047	2,2	1.193.162	2,1	6.368	0,25	128.717	89.040	1.171	199	3,1	1.151	18,1
	UKC2	559.223	7.352	5.629	1,3	1.445.849	2,5	7.717	0,25	139.806	96.711	1.271	216	2,8	1.250	16,2
	UKD1	247.746	3.257	7.182	0,5	496.734	0,9	2.651	0,25	61.937	42.845	563	96	3,6	554	20,9
	UKD3	1.107.920	14.565	1.276	11,4	2.783.397	4,9	14.856	0,25	276.980	191.602	2.519	428	2,9	2.476	16,7
	UKD4	663.487	8.722	3.263	2,7	1.482.523	2,6	7.913	0,25	165.872	114.743	1.508	256	3,2	1.483	18,7
	UKD6	487.017	6.402	2.290	2,8	921.769	1,6	4.920	0,25	121.754	84.224	1.107	188	3,8	1.088	22,1
	UKD7	590.041	7.757	908	8,5	1.530.512	2,7	8.169	0,25	147.510	102.041	1.341	228	2,8	1.319	16,1
	UKE1	409.698	5.386	3.656	1,5	928.909	1,6	4.958	0,25	102.425	70.853	931	158	3,2	916	18,5
	UKE2	397.597	5.227	8.325	0,6	813.302	1,4	4.341	0,25	99.399	68.760	904	154	3,5	889	20,5
	UKE3	564.790	7.425	1.552	4,8	1.385.564	2,4	7.395	0,25	141.198	97.674	1.284	218	3,0	1.262	17,1
	UKE4	930.588	12.234	2.029	6,0	2.302.229	4,0	12.287	0,25	232.647	160.935	2.116	360	2,9	2.080	16,9
	UKF1	992.309	13.045	4.790	2,7	2.179.995	3,8	11.635	0,25	248.077	171.609	2.256	384	3,3	2.218	19,1
	UKF2	899.732	11.828	4.918	2,4	1.802.808	3,2	9.622	0,25	224.933	155.599	2.046	348	3,6	2.011	20,9
	UKF3	377.245	4.959	6.103	0,8	744.408	1,3	3.973	0,25	94.311	65.240	858	146	3,7	843	21,2
	UKG1	735.487	9.669	5.898	1,6	1.329.762	2,3	7.097	0,25	183.872	127.194	1.672	284	4,0	1.644	23,2
	UKG2	794.554	10.445	6.204	1,7	1.606.240	2,8	8.573	0,25	198.639	137.409	1.806	307	3,6	1.776	20,7
	UKG3	1.335.306	17.554	902	19,5	2.870.360	5,0	15.320	0,25	333.827	230.926	3.036	516	3,4	2.984	19,5
	UKH1	1.347.349	17.712	12.760	1,4	2.492.091	4,4	13.301	0,25	336.837	233.009	3.063	521	3,9	3.011	22,6
	UKH2	921.247	12.111	2.878	4,2	1.851.205	3,3	9.880	0,25	230.312	159.319	2.094	356	3,6	2.059	20,8

Tabelle 28: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.

Land	NUTS-ID	Anzahl der PKW in 2014	jährliche PKW-Kilometer in Mio.	Fläche in km ²	Mio. PKW-Kilometer pro km ²	Bevölkerung mit 1. Jänner 2017	Anteil der Gesamtbevölkerung in %	Annahme für Stromverbrauch 2016 in GWh	Gewichtungsfaktor nach 2DS	Anzahl der Fahrzeuge nach Gewichtung	Anzahl der Elektrofahrzeuge nach 2DS in 2030	Gefahrene elektrische Kilometer nach 2DS in 2030 in Mio.	Energiebedarf bei 2DS in 2030 in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 2DS in 2030 in %	Energiebedarf 100 % Elektromobilität in GWh	Anteil des Strombedarfs bei 100% Elektromobilität in %
Vereinigtes Königreich	UKH3	910.951	11.975	3.948	3,0	1.808.147	3,2	9.650	0,25	227.738	157.539	2.071	352	3,6	2.036	21,1
	UKJ1	1.485.320	19.526	5.743	3,4	2.389.165	4,2	12.751	0,25	371.330	256.869	3.377	574	4,5	3.319	26,0
	UKJ2	1.460.214	19.196	5.504	3,5	2.868.537	5,0	15.310	0,25	365.054	252.528	3.320	564	3,7	3.263	21,3
	UKJ3	1.056.514	13.889	4.249	3,3	1.972.679	3,5	10.529	0,25	264.129	182.712	2.402	408	3,9	2.361	22,4
	UKJ4	871.768	11.460	3.908	2,9	1.826.320	3,2	9.747	0,25	217.942	150.763	1.982	337	3,5	1.948	20,0
	UKK1	1.384.013	18.194	7.704	2,4	2.467.531	4,3	13.170	0,25	346.003	239.350	3.147	535	4,1	3.093	23,5
	UKK2	695.531	9.143	6.209	1,5	1.323.552	2,3	7.064	0,25	173.883	120.284	1.581	269	3,8	1.554	22,0
	UKK3	282.918	3.719	3.636	1,0	557.858	1,0	2.977	0,25	70.730	48.928	643	109	3,7	632	21,2
	UKK4	584.558	7.685	6.840	1,1	1.177.705	2,1	6.286	0,25	146.140	101.093	1.329	226	3,6	1.306	20,8
	UKL1	944.000	12.410	13.443	0,9	1.956.886	3,4	10.444	0,25	236.000	163.254	2.146	365	3,5	2.110	20,2
	UKL2	538.968	7.085	7.782	0,9	1.155.919	2,0	6.169	0,25	134.742	93.208	1.225	208	3,4	1.205	19,5
	UKM2	902.538	11.865	18.296	0,6	2.085.169	3,7	11.129	0,25	225.635	156.084	2.052	349	3,1	2.017	18,1
	UKM3	999.994	13.146	13.419	1,0	2.349.308	4,1	12.539	0,25	249.999	172.938	2.273	386	3,1	2.235	17,8
	UKM5	240.787	3.165	6.544	0,5	496.536	0,9	2.650	0,25	60.197	41.641	547	93	3,5	538	20,3
UKM6	223.606	2.940	41.974	0,1	469.148	0,8	2.504	0,25	55.902	38.670	508	86	3,5	500	20,0	
UKN0	879.694	11.564	14.130	0,8	1.875.228	3,3	10.008	0,25	219.924	152.133	2.000	340	3,4	1.966	19,6	

Tabelle 29: Berechnungstabelle für den regionalisierten Strombedarf durch die Elektromobilität.