

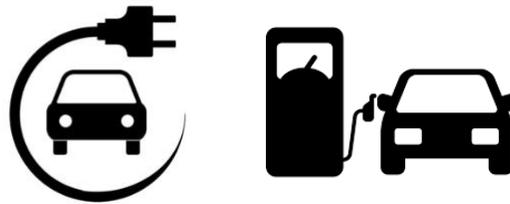
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

School of Management and Law

Bachelor of Science in Business Administration

Studienrichtung General Management

Bachelorarbeit



Emittieren Elektrofahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus
weniger CO₂ als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren?

Verfasst von

Nils Escher

Matrikelnummer: 17656588

Klasse: BO.17HS.VZGMc



Eingereicht bei

Dr. Mirjam Kosch

Management Summary

Individuelle Mobilität ist ein hohes Gut, allerdings verursacht sie einen signifikanten Anteil des weltweiten Kohlenstoffdioxid (CO₂) -Ausstosses. Jahrzehntlang waren Benzin und Diesel die vorherrschenden Treibstoffe von Fahrzeugen. Erst in den letzten Jahren durchliefen Elektrofahrzeuge die nötige Entwicklung, um wettbewerbsfähig zu sein. Heutzutage erfreuen sich Elektroautos bei Konsumenten über immer grössere Beliebtheit und die Absatzzahlen steigen stetig. Die Literatur ist allerdings widersprüchlich und es herrscht Unklarheit darüber, inwiefern sich Elektrofahrzeuge in Bezug auf den CO₂-Ausstoss von herkömmlichen Fahrzeugen unterscheiden.

In dieser Arbeit werden Benzin- und Elektrofahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus hinweg auf deren CO₂-Ausstoss untersucht, dabei werden die Schritte der Produktion, Nutzung und Recycling detailliert betrachtet. Damit jeder Abschnitt ausführlich analysiert werden kann, ist dieses Dokument als theoretische Arbeit geschrieben. Die Analyse berücksichtigt fünf Hauptabsatzmärkte von Elektroautos (USA, China, Deutschland, Norwegen, Schweiz) und wird exemplarisch an zwei Vergleichsfahrzeugen durchgeführt: Für die Analyse wird das weltweit meistverkaufte Elektroauto, das Tesla Model 3, dem vergleichbaren Benzinauto BMW 330i gegenübergestellt.

In der Herstellung emittiert der Tesla 50-95% mehr CO₂ als der BMW, da die Produktion des Lithium-Ionen-Akkus, der in jedem modernen Elektrofahrzeug eingesetzt wird, sehr viel Energie bedarf.

Während der Nutzungsphase hängt der CO₂-Ausstoss des Elektroautos von der CO₂-Intensität des Strommixes in den jeweiligen Ländern ab. Wird der Tesla in den USA, China oder Deutschland genutzt, ist er nach etwa 20'000 gefahrenen Kilometern umweltfreundlicher als der BMW nach derselben gefahrenen Strecke. In der Schweiz oder in Norwegen ist dies bereits nach etwa 14'500 Kilometer der Fall, da diese Länder den Strom CO₂-arm produzieren.

Der Recyclingprozess von herkömmlichen Benzinfahrzeugen emittiert wenig CO₂. Über die CO₂-Emissionen des Recyclingverfahrens von Lithium-Ionen-Akkus ist noch relativ wenig bekannt, da zum aktuellen Zeitpunkt fast keine Akkupakete das Ende des Lebenszyklus erreicht haben. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass der Recyclingprozess energieintensiv und somit auch CO₂-intensiv ist.

In der Arbeit wird eine Fahrzeuglebensdauer von 300'000 Kilometern angenommen. Bei Betrachtung des gesamten Fahrzeuglebenszyklus, emittiert der Tesla über diese Lebensdauer in den USA, China und Deutschland etwa 2.5-mal weniger CO₂ als der BMW 330i. In den Märkten Schweiz und Norwegen emittiert das Tesla Model 3 sogar ca. 6-mal weniger CO₂ als der BMW 330i.

Zusammenfassend ist aus der vorliegenden Arbeit ersichtlich, dass Elektroautos in jedem analysierten Markt über den gesamten Lebenszyklus weniger CO₂ ausstossen als ein vergleichbares Benzinfahrzeug. Für Konsumenten mit einem Anspruch bei der individuellen Mobilität wenig CO₂ zu verursachen, kann die Nutzung eines Elektroautos nur empfohlen werden.

Gender Erklärung

Damit die Arbeit leichter lesbar ist, wird die Sprachform des generischen Maskulinums verwendet. Die männliche Form in dieser Bachelorarbeit soll als geschlechtsunabhängig verstanden werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1. Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Forschungsfrage.....	1
1.3 Relevanz / Problemstellung / Zielsetzung.....	1
1.4 Thematische Abgrenzung und Umgang mit Unsicherheiten	2
1.5 Stand der Forschung	2
1.6 Methodik und Aufbau	4
2. Life Cycle Analyse	5
3. Herstellung	7
3.1 Erläuterung Herstellung.....	7
3.2 Fahrzeugherstellung.....	8
3.2.1 Cradle-to-Gate	9
3.2.2 Gate-to-Gate	11
3.2.3 Zusammenfassung	12
3.3 Lithium-Ionen-Batterie-Produktion	13
3.3.1 Bergbau und Raffinierung	14
3.3.2 Produktion von Batteriematerialien.....	14
3.3.3 Batteriezellenproduktion und Batteriepackmontage	15
3.4 Zusammenfassung Herstellung.....	17
3.4.1 Zusammenfassung Batteriepacketherstellung	17
3.4.2 Zusammenfassung Fahrzeugherstellung inkl. Batteriepaket	18

4. Fahrzeugnutzung	19
4.1 Erläuterung Nutzung	19
4.2 Definierte Absatzmärkte	20
4.3 Nutzung benzingetriebenes Fahrzeug	20
4.3.1 Well-to-Tank	20
4.3.2 Tank-to-Wheel.....	23
4.3.3 Well-to-Wheel	23
4.4 Elektrofahrzeug Nutzung	24
4.4.1 Strommix USA	25
4.4.2 Strommix China.....	25
4.4.3 Strommix Deutschland	25
4.4.4 Strommix Norwegen	26
4.4.5 Strommix Schweiz.....	26
4.4.6 Zusammenfassung Stromproduktion	26
4.4.7 Anwendung der Resultate.....	27
4.5 Zusammenfassung Fahrzeugnutzung	28
5. Recycling.....	29
5.1 Erläuterung Recyclingabschnitt	29
5.2 Fahrzeug Recycling	29
5.2.1 Fahrzeugdemontage.....	30
5.2.2 Trennung der Materialien	30
5.2.3 Material Zerkleinerung	30
5.2.4 Transport.....	31
5.2.5 Zusammenfassung Demontage, Trennung und Transport.....	31

5.3 Lithium-Ionen-Batterie-Recycling.....	33
5.3.1 Batteriepaketdemontage	33
5.3.2 Batteriezellenrecycling	34
5.3.3 Zusammenfassung Lithium-Ionen-Batterie-Recycling	34
5.4 Zusammenfassung Recycling	34
6. Ergebnisse der Life Cycle Analyse	36
6.1 Anwendung der Resultate	36
6.2 Allgemeine Anwendung der Resultate	38
6.3 Modellbildung.....	41
6.3.1 Darstellung der Resultate	42
7. Fazit.....	44
7.1 Beantwortung der Forschungsfrage	44
7.2 Relevanz der Ergebnisse	45
7.3 Weiterer Forschungsbedarf.....	46
7.4 Handlungsempfehlung	46
7.5 Schlussbetrachtung	46
8. Literaturverzeichnis.....	48
9. Anhang	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fahrzeug Life Cycle	5
Abbildung 2: Ablauf Abschnitt Herstellung	7
Abbildung 3: Produktionsprozess	8
Abbildung 4: Volkswagen Golf Einzelteile	9
Abbildung 5: Vergleich Gate-to-Gate & Cradle-to-Gate	13
Abbildung 6: Batterieaufbau	14
Abbildung 7: Prozessenergienutzung bei der Lithium-Ionen-Batterie Herstellung	15
Abbildung 8: Ausstoss CO ₂ -Äq. in kg für 75 kWh Batteriepaket.....	17
Abbildung 9: Ausstoss CO ₂ -Äq. in der Fahrzeugherstellung.....	18
Abbildung 10: Ablauf Abschnitt Nutzung	19
Abbildung 11: Kohlenstoffintensität der globalen Rohölförderung aus 2015	21
Abbildung 12: Anteil Ausstoss CO ₂ -Äq. für Benzin in Gramm pro Liter	23
Abbildung 13: Grafik CO ₂ -Intensität der Stromproduktion 2018 in Gramm pro kWh	27
Abbildung 14: Ablauf Abschnitt Recycling	29
Abbildung 15: CO ₂ -Ausstoss in kg für das Fahrzeugrecycling	35
Abbildung 16: Life Cycle Analyse.....	37
Abbildung 17: Life Cycle Analyse Grösser	38
Abbildung 18: Life Cycle Analyse mittlerer und schlechtesten Fall fürs E-Auto	39
Abbildung 19: CO ₂ -Ausstoss pro Kilometer.....	40
Abbildung 20: Modell für den Fahrzeugvergleich	42
Abbildung 21: Ausgabemaske Modell	43
Abbildung 22: Strommix USA.....	58
Abbildung 23: Strommix China	59
Abbildung 24: Strommix Deutschland.....	59
Abbildung 25: Strommix Norwegen	60
Abbildung 26: Strommix Schweiz	61
Abbildung 27: Recycling Batteriepaket	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich technische Daten.....	6
Tabelle 2: Cradle-to-Gate	10
Tabelle 3: Prozessschritte und deren CO ₂ Emissionen	11
Tabelle 4: Umrechnungstabelle Gate-to-Gate	12
Tabelle 5: CO ₂ -Äq. pro kWh Batterie	16
Tabelle 6: Zusammenfassung Well-to-Wheel	24
Tabelle 7: CO ₂ -Ausstoss pro Vollladung nach Ländern	28
Tabelle 8: Vergleich CO ₂ Ausstoss g/km.....	28
Tabelle 9: Prozesse Fahrzeugrecycling	31
Tabelle 10: CO ₂ Ausstoss Recycling ausgenommen Transport länderspezifisch	32
Tabelle 11: Transport im Recyclingprozess	33
Tabelle 12: Dreipunkte Schätzung Fahrzeuglebensdauer	36
Tabelle 13: Komponenten Lithium-Ionen-Batterien	57

Abkürzungsverzeichnis

AG.....	Aktiengesellschaft
Äq.....	Äquivalent
BAFU.....	Bundesamt für Umwelt
BMW.....	Bayrische Motoren Werke
CHF.....	Schweizer Franken
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
E-Auto.....	Elektroauto
EIA.....	Energy Information Administration
g.....	Gramm
kJ.....	Kilojoule
Km.....	Kilometer
KWh.....	Kilowattstunde
LKW.....	Lastkraftwagen
MJ.....	Megajoule
NMC.....	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
PKW.....	Personenkraftwagen
USA.....	United States of America
VW.....	Volkswagen
WLTP.....	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedures

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

In den letzten Jahrzehnten wurde Mobilität immer wichtiger für Menschen (Zukunftsinstitut, 2017). Ebenso ist klar, dass der Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Ausstoss weltweit reduziert werden muss, um die Erderwärmung einzudämmen (Brech, 2018). Der Individualverkehr verursacht weltweit einen signifikanten Anteil des CO₂-Ausstosses. Der Strassenverkehr ist global für ca. 18% des gesamten CO₂-Ausstosses verantwortlich (Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft, 2019). Die Personenkraftwagen (PKW) verursachen ca. 60% vom CO₂, das im Strassenverkehr emittiert wird (Europäisches Parlament, 2019). Seit der Einführung der Massenproduktion in der Automobilindustrie sind Benzin und Diesel die vorherrschenden Treibstoffe (Statista, 2019). Erst in den letzten Jahren begann ein Wandel und massentaugliche Elektrofahrzeuge durchliefen die nötige Entwicklung, um wettbewerbsfähig zu sein (Schweizerische Energie Stiftung, 2018). Um die Individualmobilität weniger CO₂ intensiv zu machen, setzen momentan viele Hersteller auf die Elektrifizierung des PKW (Statista, 2019). Nun stellt sich die Frage, ob Elektrofahrzeuge über den ganzen Fahrzeug Life Cycle weniger CO₂ verursachen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

1.2 Forschungsfrage

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wird folgende Fragestellung bearbeitet:

«Emittieren Elektrofahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus weniger CO₂ als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren?»

Dies wird anhand der Absatzmärkte USA, China, Deutschland, Norwegen und der Schweiz analysiert. Zusätzlich soll auf Basis der errechneten Daten ein Modell entwickelt werden, in welches wichtige Parameter von Fahrzeugen einzugeben werden können, um anschliessend zu eruieren, wie sich die zu vergleichenden Fahrzeuge bezüglich des CO₂-Ausstosses über den ganzen Fahrzeuglebenszyklus unterscheiden.

1.3 Relevanz / Problemstellung / Zielsetzung

Elektrofahrzeuge erfreuen sich bei Konsumenten in den letzten Jahren über immer grössere Beliebtheit und die Absatzzahlen steigen stetig (Center of Automotive Management, 2020). Was vor zehn Jahren noch ein absolutes Nischenprodukt war, ist heute eines der wichtigsten Produkte

für die Mobilität der Zukunft (Schweizerische Energie Stiftung, 2018). Es kursieren viele verschiedene Meinungen darüber, wie sich Elektrofahrzeuge in Bezug auf den CO₂-Ausstoss von herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor unterscheiden. Besonders bei der Produktion der Lithium-Ionen-Batterie, welche in allen modernen Elektrofahrzeugen verbaut wird, ist die Literatur widersprüchlich.

Ziel dieser Arbeit ist, den Unterschied der beiden Fahrzeugkonzepte bezüglich des CO₂-Ausstosses für jeden verständlich und einfach darzustellen, sowie die nötigen Hintergrundinformationen für ein Verständnis der Thematik zu geben. Zusätzlich soll für Konsumenten, für welche der CO₂-Ausstoss eines Fahrzeuges ein entscheidender Faktor beim Kauf darstellt, ein Modell entwickelt werden. Es soll Klarheit geschaffen werden, welches Antriebskonzept über den gesamten Life Cycle betrachtet weniger CO₂ emittiert. Für eine solche Analyse müssen alle Bereiche des Life Cycle berücksichtigt werden, um die gesamten Emissionen darzulegen (Cox & Bauer, 2018).

1.4 Thematische Abgrenzung und Umgang mit Unsicherheiten

In der vorliegenden Arbeit werden beide Fahrzeugkonzepte, das Elektroauto sowie das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, nur auf deren CO₂-Ausstoss analysiert. Andere Aspekte und Umwelteinflüsse fließen weder in die Berechnungen noch in das Modell ein. Zudem bezieht sich die ganze Arbeit auf den aktuellen Forschungsstand. Dabei werden keine Vermutungen über die Zukunft angestellt. Die Arbeit basiert hauptsächlich auf wissenschaftlichen Artikeln. Alle darinstehenden Daten werden hinterfragt und mit anderen Quellen zum selben Themenbereich abgeglichen und ergänzt. Die Zahlen, auf welchen das Modell basiert, können nicht zu 100% akkurat sein, da sehr viele Parameter in die Aufstellung fließen. Für einige Berechnungen mussten Annahmen getroffen werden, weshalb eine gewisse Fehlermarge nicht auszuschliessen ist. Insgesamt sind die getroffenen Annahmen allerdings so gut wie möglich wissenschaftlich gestützt und begründet. Letztendlich bietet die Arbeit einen Richtwert und soll nicht als 100% exakte Berechnung verstanden werden.

1.5 Stand der Forschung

Die Literatur über den CO₂-Ausstoss der Fahrzeugproduktion ist spärlich. Volkswagen (VW) führte allerdings eine Studie durch und analysierte jede einzelne Komponente eines VW Golfs auf dessen CO₂-Ausstoss in der Produktionsphase (Volkswagen Aktiengesellschaft, 2019). Zur

Produktion von Lithium-Ionen-Akkus ist viel Literatur vorhanden. Allerdings sind die Ergebnisse sehr unterschiedlich. Dies liegt daran, dass die Studien in verschiedenen Jahren verfasst wurden und sich die Technik der Akkuproduktion schnell verändert. Die aktuellste Studie dazu ist von Emilsson und Dahllöf aus dem Jahr 2019. In dieser Studie sind viele Verweise auf andere wissenschaftliche Artikel, die ebenfalls die Lithium-Ionen-Batterieproduktion analysieren. Über Emissionen in der Rohölförderung und Verarbeitung ist hauptsächlich die wissenschaftliche Arbeit von Masnadi et al. (2018) berücksichtigt worden, in welcher die Frage über den CO₂-Ausstoss der Rohölförderung sehr detailliert betrachtet wird. Über den CO₂-Ausstoss des Fahrzeugrecycling ist wenig wissenschaftliche Literatur vorhanden. Die Studie von Staudinger und Koeleian aus dem Jahr 2001 analysiert allerdings den gesamten Prozess sowie die Energieintensität jedes Teilschrittes. Da Lithium-Ionen-Batterien erst seit wenigen Jahren in Elektroautos eingesetzt werden, wurden bislang eine geringfügige Anzahl an Batteriepaketen recycelt. Aus diesem Grund ist über das Recycling von Akkupaketen noch wenig bekannt.

Es sind einige wissenschaftliche Arbeiten vorhanden die den gesamten Lebenszyklus analysieren, so auch der Bericht von Cox und Bauer (2018). Dieser analysiert allerdings lediglich den Schweizer Markt und jedes Antriebskonzept von Fahrzeugen (Benzin, Hybrid, Wasserstoff, Diesel, Elektro, etc.), zusätzlich ist eine detaillierte Zukunftsaussicht Teil der Arbeit. Da diese Arbeit sehr breit aufgestellt ist, geht sie nicht vertieft auf einzelne Bestandteile des Lebenszyklus ein. Ein weiteres Dokument wurde von Frischknecht et al. (2018) verfasst. Hierbei werden die Umweltauswirkungen von Elektroautos analysiert (Frischknecht et al., 2018). Dabei liegt der Fokus der Arbeit von Frischknecht et al. (2018) auf der Fahrzeugnutzung, wobei allgemeine Umweltbelastungen wie Lärm und Landinanspruchnahme ebenfalls Teil der Analyse sind. Diese Bachelorarbeit gliedert sich in die bestehende Literatur dadurch ein, dass sie lediglich zwei Fahrzeugkonzepte ausschliesslich auf deren CO₂-Ausstoss vertieft analysiert und auf jeden Schritt des Life Cycle eingeht. Eine vertiefte Analyse, beschränkt auf den CO₂-Ausstoss von Fahrzeugen über den ganzen Life Cycle, war bei Schreibbeginn nicht vorhanden. Transport & Environment (2020) verfassten ein Dokument, welches ähnlich wie diese Arbeit den CO₂-Ausstoss von Fahrzeugen über den ganzen Life Cycle in Europa analysiert. Allerdings war diese Studie noch nicht veröffentlicht, als mit der Bachelorarbeit begonnen wurde. So kann dieser Bericht als Ergänzung zu dieser Arbeit angesehen werden, welcher sich gleichermassen in die bestehende Literatur eingliedert.

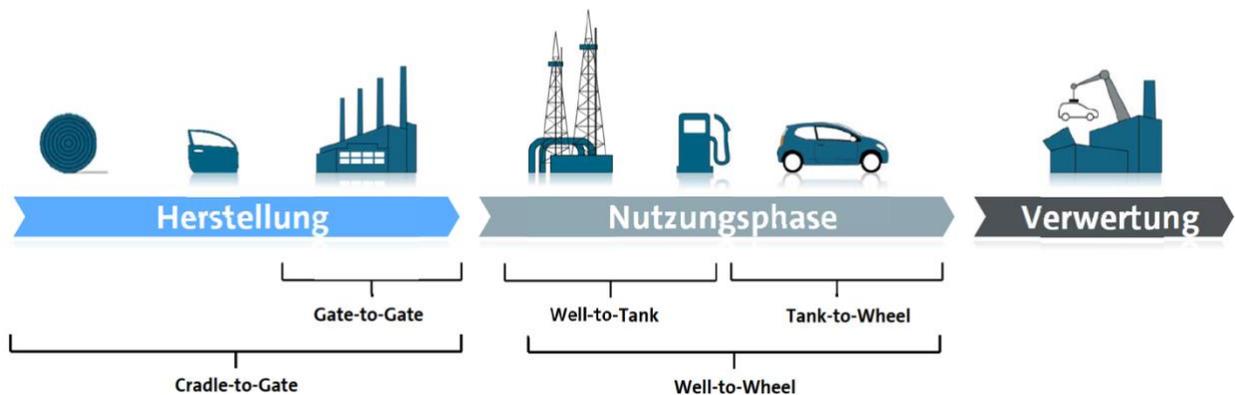
1.6 Methodik und Aufbau

Zu Beginn dieser Arbeit wird in Kapitel 2 die Life Cycle Analyse erläutert, wobei die Analyse in Absatz 3, 4 und 5 exemplarisch für zwei Vergleichsfahrzeuge durchgeführt wird. Anschliessend an die Analyse werden alle Ergebnisse im Abschnitt 6 zusammengetragen und in einer Zusammenfassung die Resultate über den gesamten Fahrzeuglebenszyklus präsentiert. Im selben Abschnitt befindet sich der Teil der Modellbildung. In diesem wird das entwickelte Modell erklärt und erläutert, wozu es dient. Nach diesem Abschnitt folgt das Fazit, in dem alle wichtigen Erkenntnisse aus der Arbeit zusammengefasst werden und die Forschungsfrage beantwortet wird. Die ganze Arbeit ist eine Literaturarbeit, wobei die nötigen Informationen hauptsächlich aus wissenschaftlichen Artikeln und Arbeiten stammen.

2. Life Cycle Analyse

Es gilt über den ganzen Fahrzeuglebenszyklus zu analysieren, wie sich ein Elektroauto und ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor bezüglich des CO₂-Ausstosses unterscheiden. Wie in Abbildung 1 illustriert, ist die Life Cycle Analyse in der vorliegenden Arbeit in drei Teile gegliedert: Herstellung, Nutzung und Verwertung.

Abbildung 1: Fahrzeug Life Cycle



Quelle: Volkswagen Aktiengesellschaft, 2019

Für den Vergleich wird das weltweit meistverkaufte Elektroauto als Referenz verwendet. Mit über 300'000 abgesetzten Fahrzeugen im Jahr 2019 verkaufte sich das Tesla Model 3 weltweit am besten (Kane, 2020). Die Model 3 long range Version ist in der Schweiz ab CHF 56'000.- erhältlich und verfügt gemäss dem Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedures (WLTP) über eine Reichweite von 560 km (Tesla, 2020). Seit 2017 werden Reichweiten nach dem neuen WLTP Fahrzyklus errechnet (Bundesamt für Energie & Bundesamt für Strassen, 2018). WLTP ist ein Testverfahren und dient als Grundlage, um unterschiedliche Fahrzeugkonzepte miteinander zu vergleichen. Hierbei werden Elektrofahrzeuge auf deren Reichweite und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren auf deren Verbrauch getestet (Bundesamt für Energie & Bundesamt für Strassen, 2018). Der WLTP Fahrzyklus versucht ein möglichst realistisches Fahrprofil wieder zu spiegeln. Für den Vergleich in der vorliegenden Arbeit wurde ein benzingetriebenes Fahrzeug gesucht, welches dem Tesla von den Spezifikationen ähnlich ist. Als vergleichbares Benzinfahrzeug wird ein BMW 330i xDrive verwendet. Dieser ist in der Schweiz ab CHF 59'600.- erhältlich und verfügt wie der Tesla über Allradantrieb (BMW Schweiz, 2020). Das Gewicht des Tesla ist etwas höher, was dem über 450 kg schweren Batteriepaket zuzuschreiben ist (Iqtidar,

2019). Beide Fahrzeuge sind in der Mittelklasse angesiedelt (Autokiste, 2020). Bei Betrachtung von Tabelle 1 wird ersichtlich, dass die grössten Unterschiede in der Leistung und der Reichweite liegen. Der Grund sind die unterschiedlichen Antriebskonzepte der beiden Fahrzeuge. Die Reichweite des Tesla wird durch die Akkugrösse limitiert, hingegen hat dieser bei der Leistung einen Vorteil, da Elektromotoren effizienter als Benzinmotoren arbeiten (Vaillant, 2016); (Gloor, 2011).

Tabelle 1: Vergleich technische Daten

	Preis in CHF	Leistung	Gewicht in kg	Fahrzeugklasse	Reichweite nach WLTP
Tesla Model 3 long range dual motor	56'000	351 PS	1'847	Mittelklasse	560 km
BMW 330i xDrive	59'600	258 PS	1'640	Mittelklasse	746 km*

*Errechnet: Tankinhalt 59 Liter, WLTP Verbrauch Hersteller: 7.8 Liter/100 km

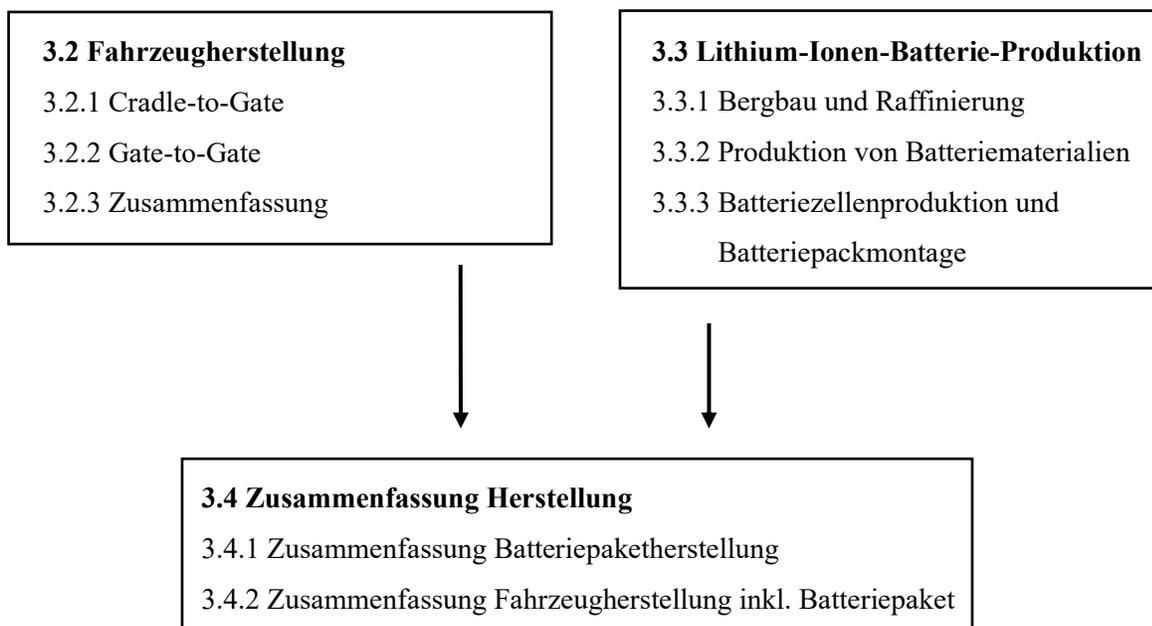
Quellen: BMW Schweiz, 2020; Tesla, 2020

3. Herstellung

3.1 Erläuterung Herstellung

In diesem Abschnitt wird die Herstellung der beiden Fahrzeugkonzepte analysiert. Der erste Teil behandelt die Fahrzeugherstellung. Dieser Abschnitt ist in Cradle-to-Gate und Gate-to-Gate unterteilt. Das Cradle-to-Gate umfasst alle Produktionsschritte, vom Materialabbau bis zum fertigen Fahrzeug, die benötigt werden um ein Auto zu produzieren (Volkswagen, 2019). Gate-to-Gate ist der letzte Schritt in der Fahrzeugproduktion. Dieser umfasst die Fahrzeugmontage beim Hersteller sowie Lieferanten von fertigen Bauteilen die z.B. ein Getriebe oder die Fahrzeugelektronik produzieren (Gelowicz, 2019). Im zweiten Teil des Herstellungsabschnittes wird die Herstellung des Akkupaketes des Tesla Model 3 behandelt. Das Batteriepaket wird bei der Gate-to-Gate sowie der Cradle-to-Gate Berechnung nicht berücksichtigt. Dieses wird separat im darauffolgenden Abschnitt behandelt, da es für einen signifikanten Anteil des CO₂ Ausstosses der Produktion verantwortlich ist (Volkswagen Aktiengesellschaft, 2019). Im Anschluss an diese beiden Abschnitte werden die Erkenntnisse zusammengefasst und anschaulich dargestellt. Abbildung 2 illustriert die Gliederung des Abschnittes zur Herstellung und zeigt welche Themen in den einzelnen Kapiteln behandelt werden.

Abbildung 2: Ablauf Abschnitt Herstellung

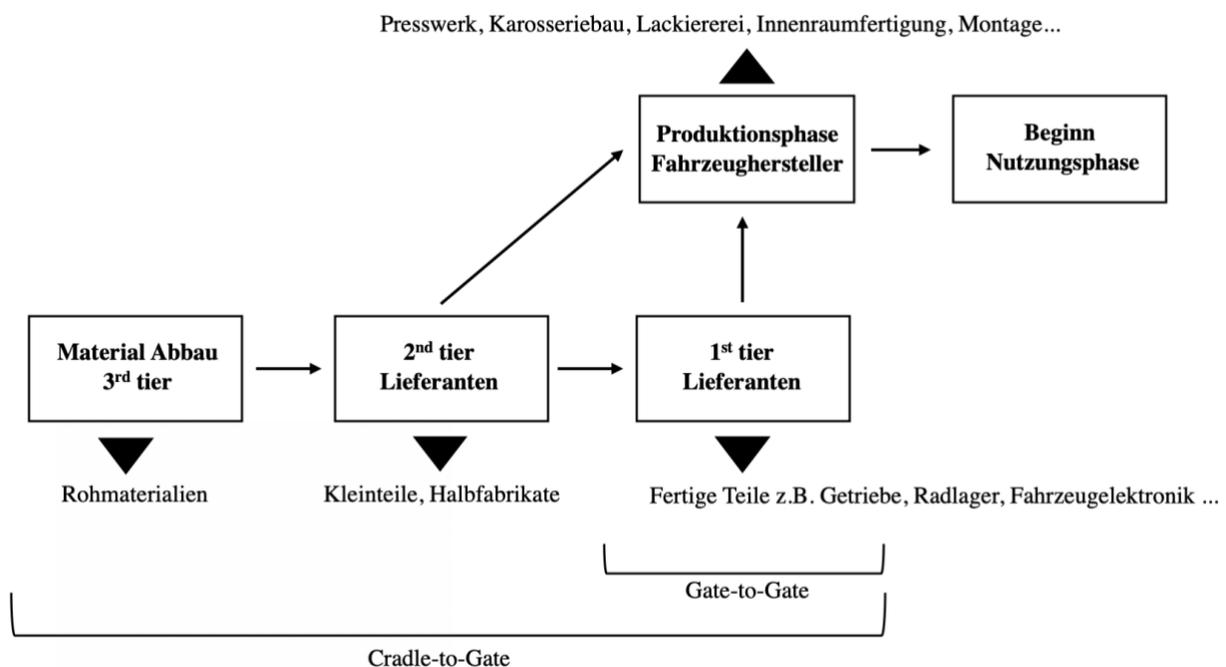


3.2 Fahrzeugherstellung

Beide Fahrzeugkonzepte verfügen über eine gewisse Schnittmenge an Teilen, die in beiden Autos unabhängig vom Antrieb verbaut sind. Dies sind z.B. Türen, Innenausstattung, Fahrzeugelektronik, Reifen, Felgen, Karosserie, Scheiben, Bremsen und Fahrwerk (Cox & Bauer, 2018). So wird deutlich, dass beide Fahrzeuge viele gemeinsame Bauteile aufweisen und sich nur im Antrieb unterscheiden. Abbildung 3 zum Produktionsprozess gilt deshalb für beide Fahrzeugkonzepte, das Akkupaket des Tesla ausgeschlossen.

Die Zulieferer der Automobileindustrie können vereinfacht in drei verschiedene Kategorien unterteilt werden (Gelowicz, 2019). Wie in Abbildung 3 ersichtlich, produzieren 3rd tier Lieferanten die Rohmaterialien, welche andere Lieferanten als Basis ihrer Produkte verwenden. 2nd tier Lieferanten stellen Kleinteile wie z.B. Schrauben und Halbfabrikate her. Diese werden an 1st tier Lieferanten oder direkt an den Fahrzeughersteller geliefert. Die letzte Stufe der Zulieferer sind die 1st tier Lieferanten. Diese produzieren fertige Komponenten, welche direkt an den Fahrzeughersteller gesendet und im PKW verbaut werden. Es handelt sich beispielsweise um Bauteile wie komplette Getriebe, Fahrzeugelektronik oder Fahrwerksteile (Gelowicz, 2019).

Abbildung 3: Produktionsprozess



Quellen: Ambe & Badenhorst-Weiss, 2011; Fysikopoulos et al., 2012; Some, 2018; Gelowicz, 2019

3.2.1 Cradle-to-Gate

Die Cradle-to-Gate Analyse errechnet, wie viel CO₂-Äquivalente (Äq.) bei der Herstellung eines Fahrzeugs ausgestossen werden (Volkswagen Aktiengesellschaft, 2019). Dabei wird nicht nur die Fahrzeugproduktion betrachtet, sondern jeder Schritt, der für die Fahrzeugproduktion notwendig ist (Volkswagen Aktiengesellschaft, 2019). Es wird für alle Bauteile des Fahrzeuges berechnet, wie viel CO₂-Äq. während der Herstellung ausgestossen werden. Dies beinhaltet für jedes Einzelteil die Prozesse des Rohstoffabbaus, der Produktion, den Transport und den Einbau in das Fahrzeug. Für den BMW und den Tesla liegen keine Daten über eine Cradle-to-Gate Berechnung vor. Allerdings führte Volkswagen 2019 eine Studie durch und berechnete für den VW Golf das Cradle-to-Gate. Die Berechnung für den VW Golf, die durch die Volkswagen AG (2019) ausgeführt wurde, umfasst ca. 11'000 Zeilen und ca. 40'000 Prozesse. In Abbildung 4 sind alle Einzelteile eines VW Golfs zu sehen. Da eine solche Berechnung die Kapazität dieser Arbeit übersteigt, wird die von VW durchgeführte Analyse als Grundlage verwendet. Basierend auf dieser Grundlage kann mittels dem Fahrzeuggewicht errechnet werden, wie viel CO₂-Äq. für die Produktion der beiden ausgewählten Vergleichsfahrzeuge ausgestossen werden.

Abbildung 4: Volkswagen Golf Einzelteile



Quelle: Volkswagen Aktiengesellschaft, 2019

Dabei wird angenommen, dass die Cradle-to-Gate Berechnung bei den unterschiedlichen Fahrzeugen ähnlich ist. Die Berechnung basiert auf dem GREET 2 Modell (Argonne National Laboratory, 2019). Eine wichtige Komponente des Modells ist eine gewichtsbasierte Verteilfunktion von Materialien, die in einem PKW verbaut werden (Argonne National Laboratory, 2019). Das Modell sagt aus, dass einzelne Komponenten in Fahrzeugen derselben Klasse im gleichen Prozentsatz schwerer werden wie das gesamte Fahrzeuggewicht. Aufbauend auf diesem Modell kann anhand des Fahrzeuggewichtes des VW Golf auf die Vergleichsfahrzeuge Tesla und BMW geschlossen werden. Die Grundmaterialien für die Karosserie, Reifen, Felgen, Innenausstattung, etc. unterscheiden sich bei verschiedenen Fahrzeugen nicht (Cox & Bauer, 2018). Aus diesem Grund funktioniert die Berechnung auf Basis des GREET 2 Modells (Argonne National Laboratory, 2019) für den BMW aber auch den Tesla, das Batteriepaket ausgeschlossen. Tabelle 2 zeigt über den gesamten Produktionszeitraum, vom Materialabbau bis zum fertigen Fahrzeug, wie viel CO₂-Äq. emittiert werden.

Tabelle 2: Cradle-to-Gate

Fahrzeug	Gewicht	CO ₂ Äquivalent der Produktion
Tesla Model 3 long range dual motor	1'847 kg - 478 kg (Batterie) 1'369 kg	= 5'838 kg
BMW 330i xDrive	1'640 kg	6'994 kg
Volkswagen Golf 7 als Basiswert	1'360 kg	5'800 kg*

*Für die Produktion des Golfs fallen auf 200'000 km pro km 29 Gramm CO₂ Äquivalente an.

Quellen: Tesla, 2020; Iqtidar, 2019; BMW Schweiz, 2020; Volkswagen Aktiengesellschaft, 2019

$$CO_2 \text{ Ausstoss Produktion Tesla ohne Akku} = \frac{5800kg \text{ CO}_2}{1360kg} * 1369kg = 5838kg \text{ CO}_2$$

$$CO_2 \text{ Ausstoss Produktion BMW} = \frac{5800kg \text{ CO}_2}{1360kg} * 1640kg = 6994kg \text{ CO}_2$$

3.2.2 Gate-to-Gate

Unter Gate-to-Gate wird der Schritt von der Teileproduktion der 1st tier Lieferanten sowie den Fahrzeugbau beim Hersteller verstanden. Die Teilschritte sind in Abbildung 3 ersichtlich. Sullivan et al. (2010) analysiert, wie viel Energie für die Fahrzeugteileherstellung und den Zusammenbau benötigt wird sowie wie viele Emissionen dabei erzeugt werden. Die Ergebnisse der Analyse sind nach Prozessklassen in Tabelle 3 dargestellt. Von allen Einträgen in der Tabelle machen die Materialumwandlungsprozesse, einschliesslich der maschinellen Bearbeitung, mit 56% der Energiebelastung insgesamt den grössten Anteil aus. Darauf folgt die Energiebelastung aufgrund von Heizung sowie Klimatisierung aller Gebäude, welche für die Produktion betrieben werden müssen. Die beiden Prozessklassen zusammen beanspruchen über 75% der Energie, die für alle Prozesse im Gate-to-Gate Prozess benötigt wird. Arbeitsschritte wie der Materialtransport oder die Druckluftgenerierung emittieren vergleichsweise eine geringe Menge an CO₂ im Gate-to-Gate Prozess. Die CO₂-Daten in der untenstehenden Tabelle basieren auf einem Fahrzeuggewicht von 1532 kg (Sullivan et al., 2010).

Tabelle 3: Prozessschritte und deren CO₂ Emissionen

Prozessklassen	kg CO ₂ *
Material Transformation & Verarbeitung**	1'121
Fahrzeug Lackierung	268
Heizung, Belüftung und Klimatisierung	420
Materialtransport	46
Schweissen	62
Druckluft Generierung	93
Andere	3
Total	2'013

*Zahlen für ein Fahrzeuggewicht von 1532 kg

**z.B. Aluminium fräsen, Stahl pressen, stanzen und ähnliches

Quelle: Sullivan et al., 2010

Um die Daten aus Tabelle 3 auf andere Fahrzeuge anzuwenden, wird die Gate-to-Gate Berechnung von Sullivan et al. (2010) auf Basis des GREET 2 Modells (Argonne National Laboratory, 2019) anhand des Fahrzeuggewichts auf die Vergleichsfahrzeuge BMW und Tesla hochgerechnet. Beim BMW ist dies das Fahrzeuggewicht und beim Tesla das Gewicht des PKW ohne das Batteriepaket.

Tabelle 4 zeigt die Umrechnung von Fahrzeuggewicht, das von Sullivan et al. (2010) für die Gate-to-Gate Berechnung angenommen wurde, auf das Gewicht des BMW und Tesla ohne Batteriepaket. Das Basisfahrzeuggewicht aus Sullivan et al. (2010) ist auf 1'532 kg bestimmt. Durch die Hochrechnung wird ersichtlich, dass der BMW im Produktionsprozess Gate-to-Gate mehr CO₂ emittiert als der Tesla. Dies kann auf das unterschiedliche Gewicht der beiden Fahrzeuge, welches beim BMW höher ist als beim Tesla ohne Batteriepaket, zurückgeführt werden.

Tabelle 4: Umrechnungstabelle Gate-to-Gate

Fahrzeug	kg CO ₂
Gate-to-Gate Berechnung von Sullivan et al. bei Basisfahrzeuggewicht von 1'532kg	2'013
Tesla Model 3 long range dual motor	1'799*
BMW 330i xDrive	2'155**

Quellen: Sullivan et al., 2010; Tesla, 2020; BMW Schweiz, 2020

$$CO_2 \text{ Ausstoss Gate-to-Gate Tesla} = \frac{2013 \text{ kg } CO_2}{1532 \text{ kg}} * 1369 \text{ kg} = 1799 \text{ kg } CO_2$$

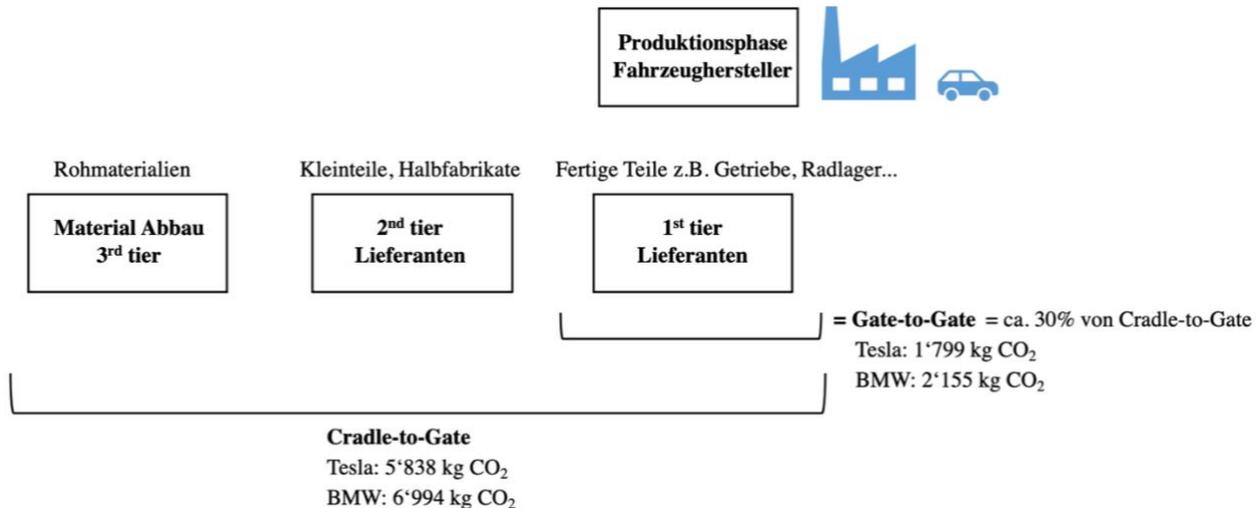
$$CO_2 \text{ Ausstoss Gate-to-Gate BMW} = \frac{2013 \text{ kg } CO_2}{1532 \text{ kg}} * 1640 \text{ kg} = 2155 \text{ kg } CO_2$$

3.2.3 Zusammenfassung

Ein Vergleich der Daten aus der Gate-to-Gate und der Cradle-to-Gate Berechnung zeigt, dass etwa ein Drittel des CO₂-Ausstosses bei der Herstellung im Gate-to-Gate Prozess ausgestossen wird, wie in Abbildung 5 dargestellt. Der restliche Anteil entfällt auf den Rohmaterialabbau, die Rohmaterialverarbeitung und die Vorfabrikation von Halbfabrikaten und Kleinstteilen. Ebenfalls zeigt Abbildung 5, wie viel CO₂ durch den BMW und den Tesla im jeweiligen Prozessschritt emittiert wird. Über den ganzen Cradle-to-Gate Prozess ist dies für den Tesla ohne das Akkupaket 5'838 kg CO₂ und den BMW 6'994 kg CO₂. Die grössere Klammer in Abbildung 5 umfasst alle Prozessschritte, die zum Cradle-to-Gate gehören, die kleinere Klammer beinhaltet den Gate-to-Gate Prozess. Da der Tesla ohne das Akkupaket leichter ist als der BMW, emittiert dieser in beiden Prozessen weniger CO₂. Allerdings sind diese Resultate noch nicht das finale Ergebnis für den

Produktionsprozess, da der CO₂-Ausstoss, welcher durch die Lithium-Ionen-Akkupaket-Produktion verursacht wird, nicht in diese Berechnung eingeflossen ist. Auf dieses wird im folgenden Abschnitt 3.3 separat eingegangen.

Abbildung 5: Vergleich Gate-to-Gate & Cradle-to-Gate



Quellen: Sullivan et al., 2010; Volkswagen Aktiengesellschaft, 2019; Ambe & Badenhorst-Weiss, 2011; Fysikopoulos et al., 2012; Some, 2018; Gelowicz, 2019

3.3 Lithium-Ionen-Batterie-Produktion

Die ökologischen Auswirkungen der Lithium-Ionen-Batterie-Produktion werden in verschiedene Teile gegliedert (Emilsson & Dahllöf, 2019).

- Bergbau und Raffinierung
- Produktion von Batteriematerialien
- Batteriezellenproduktion und Batteriepackmontage

Die Schritte können sich für Batterien unterscheiden, welche im selben Kontinent, Land oder sogar in derselben Fabrik hergestellt werden (Emilsson & Dahllöf, 2019). Eine Erklärung hierfür ist die unterschiedliche Materialbeschaffung für einzelne Komponenten der Batterien, wobei sich unter anderem Transportmethoden und Transportwege unterscheiden können (Q. Dai et al., 2018b). Ausserdem gibt es oft mehrere chemischen Prozesswege, welche das gewünschte Produkt generieren (Emilsson & Dahllöf, 2019).

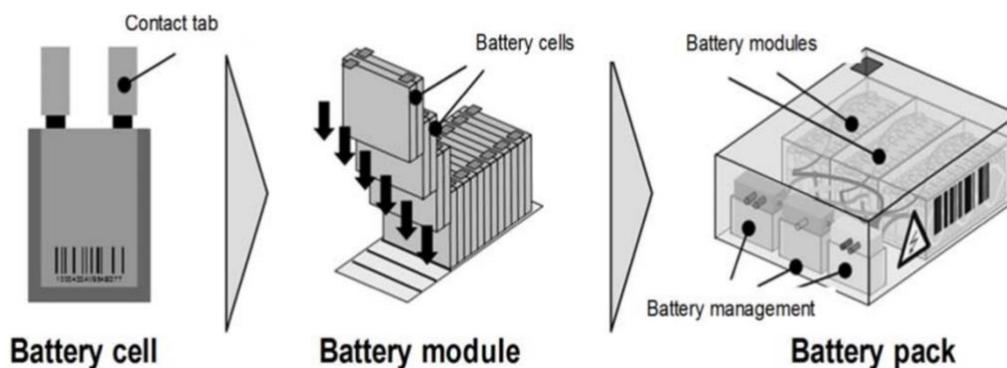
3.3.1 Bergbau und Raffinierung

Für Batterien in rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen werden mehrere Metalle benötigt. Alle Hersteller der Automobilindustrie von Lithium-Ionen-Akkus verwenden entweder Lithium-Mangan-Kobalt-Oxid oder Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid-Chemikalien (Emilsson & Dahllöf, 2019). Beide Zusammensetzungen erfordern das seltene Element Kobalt sowie die Metalle Lithium, Nickel, Kupfer und Aluminium. Die Energienutzung in Bergwerken kann sich je nach Art der Mine unterscheiden (Q. Dai et al., 2018b). Der CO₂-Ausstoss pro Tonne abgebautes Erz ist deutlich höher, wenn der Energiebedarf der Mine ausschliesslich durch Dieselgeneratoren gedeckt wird, als wenn die Mine am Elektrizitätsnetz angeschlossen ist (Q. Dai et al., 2018b).

3.3.2 Produktion von Batteriematerialien

Die Produktion der einzelnen Bestandteile einer Lithium-Ionen-Batterie ist unterschiedlich energieintensiv (Q. Dai et al., 2018a). Untersuchungen aus einer Batterie-Produktionsstätte zeigen auf, wie viel Energie nötig ist, um die einzelnen Komponenten herzustellen. Abbildung 6 zeigt die Hauptkomponenten einer Lithium-Ionen-Batterie der Automobilindustrie: Zell Komponenten, Modul Komponenten und Batteriepack Komponenten.

Abbildung 6: Batterieaufbau



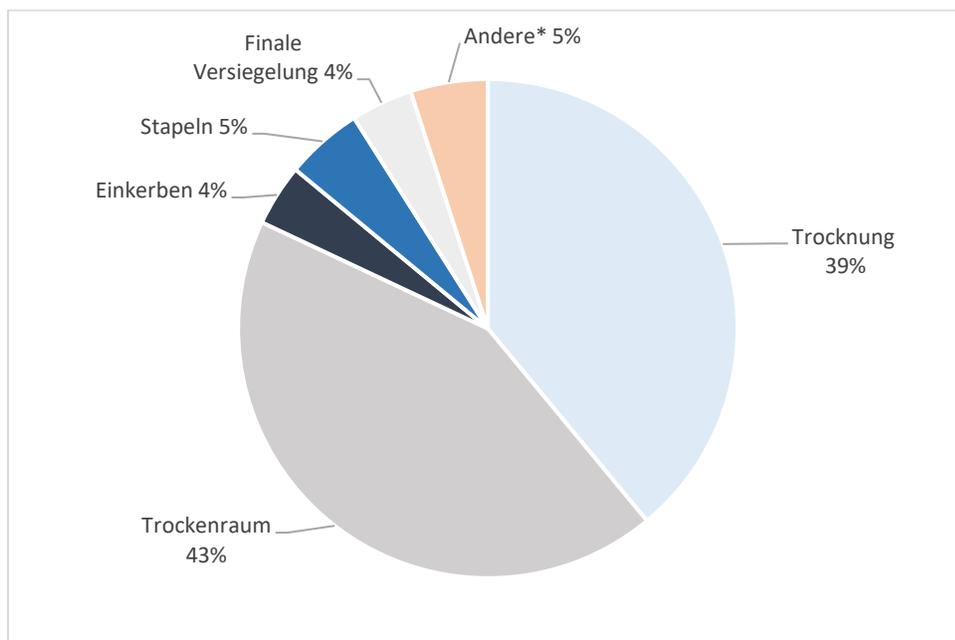
Quelle: World Academy of Science, 2016

Tabelle 13 im Anhang zeigt auf, welcher Bestandteil in einer Batteriezelle die meiste Energie benötigt, bis diese in der Batterie verbaut sind.

3.3.3 Batteriezellenproduktion und Batteriepackmontage

Für die Herstellung von Batteriezellen sind mehrere Schritte notwendig (Yuan et al., 2017). Die einzelnen Zellen werden zu Modulen zusammengesetzt und diese Module ergeben zusammen ein Batteriepack. Bei der Montage zum Batteriepack werden zusätzliche Elemente wie die Kühlung oder die Verkabelung der einzelnen Module eingebaut (Yuan et al., 2017). Durch die gestiegene Nachfrage an Batterien wurde das Bewusstsein in der Batterieherstellung erhöht (Ellingsen et al., 2017). Dadurch konnten genauere Daten gesammelt werden und mehr Prozesse wurden in die Analyse über den gesamten Energieverbrauch mit einbezogen (Ellingsen et al., 2017). In einer Studie führte Yuan et al. (2017) eine Energieanalyse auf Prozessebene für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge durch. Die gemessenen Daten basieren auf einer industriellen Produktionsanlage im Pilotmassstab. Die Elektrodentrocknung und die Trockenraumanlage wurden als die beiden grössten Energieverbraucher bei der Herstellung von Batteriezellen identifiziert, was in Abbildung 7 ersichtlich ist (Yuan et al., 2017). Die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien muss in Trockenräumen stattfinden, in welchen eine extrem niedrige Luftfeuchtigkeit herrscht (Munters, 2020).

Abbildung 7: Prozessenergienutzung bei der Lithium-Ionen-Batterie Herstellung



*Andere enthalten: Bergbau, Beschichtung, Prozessplanung, Schweißen & Versiegeln, Vorabladen

Quelle: Yuan et al., 2017

Anhand der Energie, welche aufgewendet wird um die Materialien zu produzieren und die Prozesse zu versorgen, werden die ökologischen Auswirkungen der Batterieproduktion berechnet (Dai et al., 2019). Hierbei kann keine genaue Zahl definiert werden, da der verwendete Strommix in der Batterieproduktion je nach Fabrik unterschiedlich ist (Emilsson & Dahllöf, 2019). Dai et al. (2019) kam zum Ergebnis, dass 72.9 kg CO₂-Äq. pro kWh Batteriekapazität emittiert werden. Allerdings ist aus der Arbeit von Dai et al. (2019) nicht zu entnehmen, welcher Strommix für die Berechnung verwendet wurde. Emilsson und Dahllöf (2019) hingegen untersuchten verschiedene Strommixe in der Batteriezellenproduktion. Wie in Tabelle 5 ersichtlich, ist die Spannweite der Resultate gross. Von den 72.9 kg CO₂-Äq. aus Dai et al. (2019) werden 19% bei der Batteriezellenproduktion ausgestossen. Werden diese 19% vom Gesamten abgezogen, ergibt das für die vorgelagerte Materialbeschaffung einen Ausstoss von 59 kg CO₂-Äq. pro kWh Kapazität.

Für die Zellproduktion und den Batteriepacketzusammenbau sind die Energienutzung und der Strommix der Produktionsstätte entscheidend (Emilsson & Dahllöf, 2019). Emilsson und Dahllöf (2019) nennen in Ihrer Studie die Energie für die Zellproduktion und den Batteriepackzusammenbau Prozessenergie. Der CO₂-Ausstoss für die Batteriezellenproduktion kann von 2 bis 47 kg CO₂-Äq. pro kWh Batteriekapazität betragen, was in Tabelle 5 illustriert ist (Emilsson & Dahllöf, 2019). Die untenstehende Tabelle zeigt die totalen Emissionen, welche durch die Batterieproduktion verursacht wird. Dabei beträgt der Ausstoss 61-106 kg CO₂-Äq. pro kWh Akkukapazität.

Tabelle 5: CO₂-Äq. pro kWh Batterie

Schritt der Produktion	Energienutzung in kg CO ₂ Äq. pro kWh
Materialbeschaffung	59
Zell Produktion und Batteriepackzusammenbau	2 - 47
Total	61 - 106

Quellen: Emilsson & Dahllöf, 2019, Dai et al., 2019

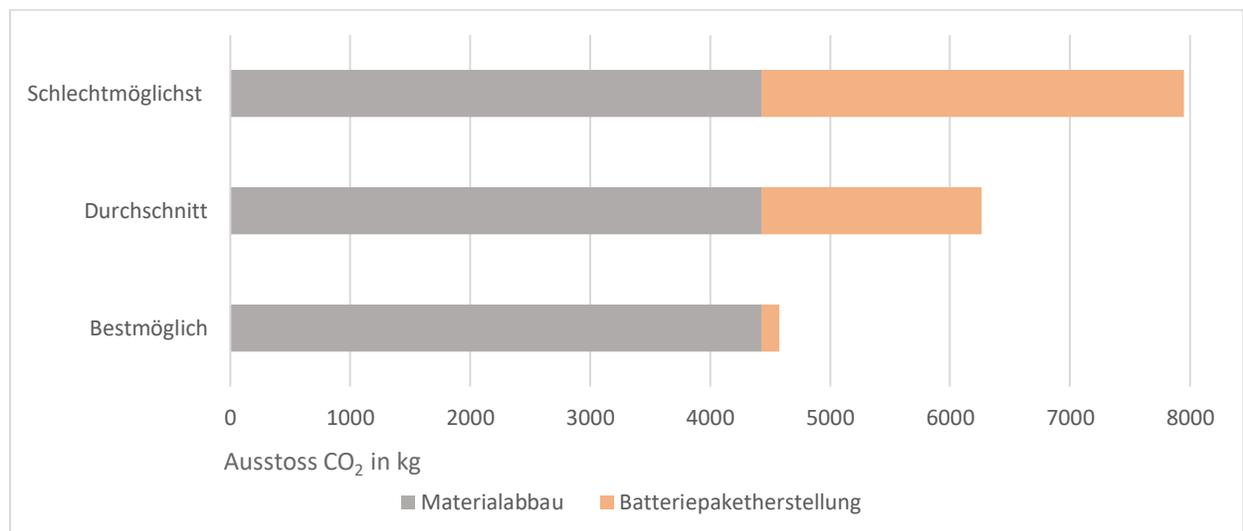
$$CO_2 \text{ Ausstoss Materialbeschaffung} = \frac{72.9 \text{ kg } CO_2}{100} * 81 = 59 \text{ kg } CO_2$$

3.4 Zusammenfassung Herstellung

3.4.1 Zusammenfassung Batteriepaketherstellung

Bei der Batterieherstellung für ein Elektroauto liegt die Spannweite des CO₂-Ausstosses zwischen 61-106 kg CO₂-Äq. pro kWh Akkukapazität (Emilsson & Dahllöf, 2019). Aus diesem Grund werden für die Batterieherstellung drei Szenarien definiert: Das Bestmögliche, welches bei 61 kg CO₂-Äq. pro kWh liegt, das Durchschnittliche, wobei 83.5 kg CO₂-Äq. pro kWh als Durchschnitt von 61 und 106 errechnet wird und das Schlechtmöglichste, welches 106 kg CO₂-Äq. pro kWh ist (Emilsson & Dahllöf, 2019). Das Tesla Model 3 long range besitzt eine Akkukapazität von 75 kWh (Tesla, 2020). Das Diagramm in Abbildung 8 stellt die drei Szenarien (bestmöglich, Durchschnitt und schlechtmöglichst) für die Batterieherstellung dar. In der Grafik ist zu erkennen, dass der Unterschied zwischen dem best- und schlechtmöglichsten Fall über 3'000 kg CO₂-Äq. ist. Das bestmögliche Szenario rechnet, dass die Prozessenergie, welche bei der Batteriepaketherstellung benötigt wird, fast ausschliesslich aus erneuerbaren Stromquellen stammt. Die schlechtmöglichste Situation hingegen geht von einem hohen Anteil an fossilen Energieträgern aus und nur einem kleinen Anteile erneuerbarer Stromquellen (Emilsson & Dahllöf, 2019). Das durchschnittliche Szenario bezieht sich somit auf einen Mix aus den beiden oben erwähnten Szenarien. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, variiert bei der Batteriepaketherstellung der CO₂-Ausstoss aufgrund verschiedener Strommixe. Dieser Prozess ist sehr energieintensiv, weshalb entscheidend ist, mit welchem Strommix das Batteriepaket produziert wird (Emilsson & Dahllöf, 2019).

Abbildung 8: Ausstoss CO₂-Äq. in kg für 75 kWh Batteriepaket

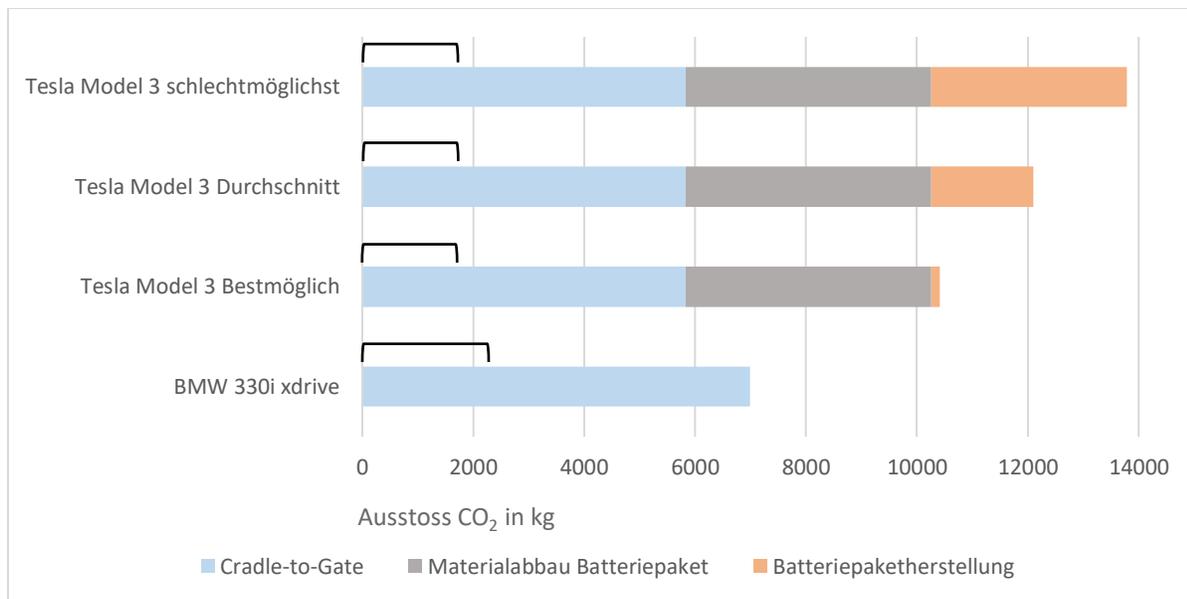


Slechtmöglichst: hoher Anteil fossiler Energieträger. Bestmöglich: hoher Anteil erneuerbare Energiequellen.

3.4.2 Zusammenfassung Fahrzeugherstellung inkl. Batteriepaket

Abbildung 9 zeigt den gesamten CO₂-Ausstoss, welcher durch die Fahrzeugproduktion verursacht wird. Beim Tesla werden für die Batterieherstellung drei Szenarien unterschieden, wie in Abbildung 8 dargestellt. Da der Tesla ohne das Batteriepaket leichter ist als der BMW, fällt in der Cradle-to-Gate Berechnung weniger CO₂ an als beim BMW. Allerdings ist das 75 kWh Batteriepaket des Tesla für einen signifikanten Anteil der Emissionen bei der Herstellung verantwortlich, was Abbildung 9 deutlich zeigt.

Abbildung 9: Ausstoss CO₂-Äq. in der Fahrzeugherstellung



┌───┐ = Gate-to-Gate

Die Haupteckdaten aus dem Abschnitt Herstellung ist, dass ein herkömmliches benzinbetriebenes Fahrzeug in der Produktion weniger CO₂ emittiert als ein vergleichbares Elektrofahrzeug. Die Differenz im CO₂-Ausstoss zwischen den Fahrzeugkonzepten ist je nach Strommix für die Batteriepaketherstellung unterschiedlich. Wird die Batterie des Tesla im bestmöglichen Szenario produziert, emittiert die Produktion des Elektrofahrzeugs etwa 3'400 kg CO₂-Äq. mehr verglichen zum Benzinfahrzeug. Wird das Batteriepaket des Tesla im schlechtesten Szenario produziert, steigt dieser Unterschied auf knapp 6'800 kg CO₂-Äq. Tesla produziert alle Batterien in der eigenen Gigafactory und diese arbeitet hauptsächlich mit erneuerbaren Energiequellen, weshalb für das Beispiel Tesla hier das bestmögliche Szenario verwendet wird (Tesla Schweiz, 2020).

4. Fahrzeugnutzung

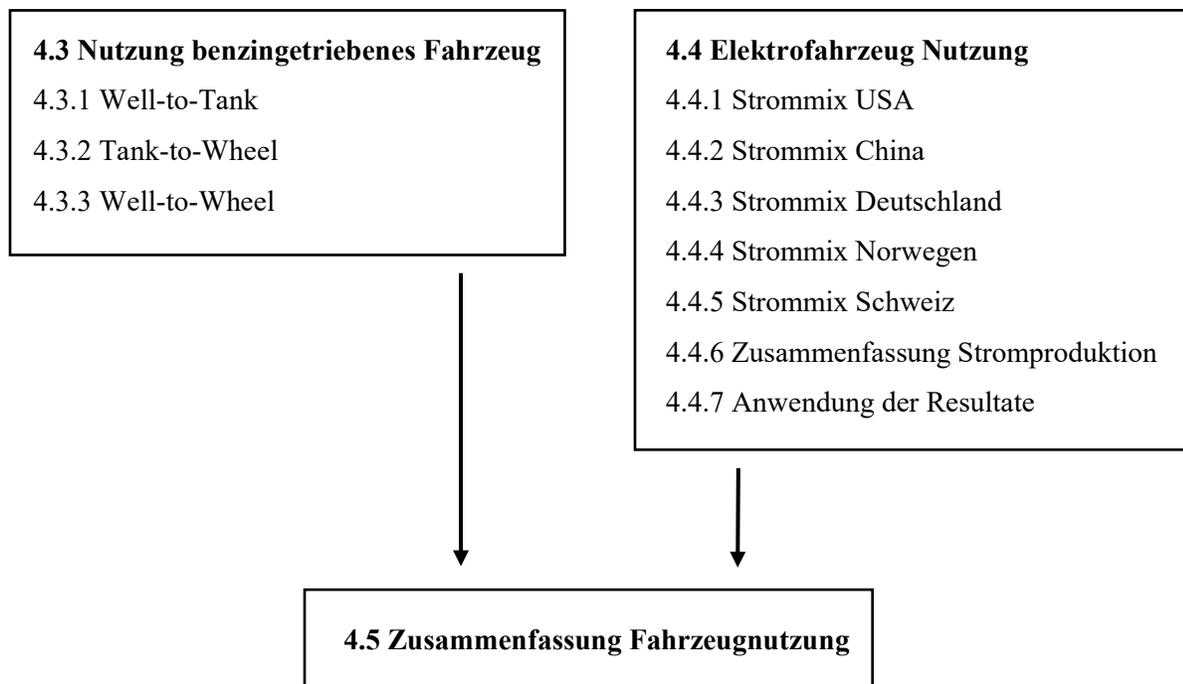
Im Abschnitt Fahrzeugnutzung wird analysiert, wie viel CO₂ die Fahrzeuge im Betrieb ausstossen. Bei einem benzingetriebenen Fahrzeug sind zwei Aspekte zu berücksichtigen: Der direkte CO₂-Ausstoss des Fahrzeuges, wenn dieses bewegt wird und die Emissionen welche bei der Förderung, Verarbeitung und dem Transport von Benzin entstehen.

Ein Elektroauto stösst direkt kein CO₂ aus, allerdings verursacht die Stromproduktion für die Fortbewegung des Elektroautos CO₂-Emissionen, welche es zu analysieren gilt (Pucher, 2020). Da alle Länder einen anderen Strommix aufweist, kann dies nicht verallgemeinert werden und muss für jedes Land separat betrachtet werden (Sandbag, 2019).

4.1 Erläuterung Nutzung

Der Abschnitt Nutzung ist in drei Unterkapitel gegliedert. Als erstes wird genauer auf die Nutzung eines benzingetriebenen Fahrzeuges eingegangen. Danach wird die Nutzung eines Elektroautos analysiert und zum Schluss die Ergebnisse zusammengetragen und zusammengefasst.

Abbildung 10: Ablauf Abschnitt Nutzung



4.2 Definierte Absatzmärkte

Für die Definition der Absatzmärkte wird der Electromobility Report von dem Center of Automotive Management (2020) als Basis verwendet. Dieser Bericht zeigt auf, in welchen Ländern die meisten Elektroautos abgesetzt werden (Center of Automotive Management, 2020). Je mehr Elektroautos verkauft werden, desto bedeutender ist der Strommix und der damit verbundene CO₂-Ausstoss in diesen Staaten. In China, den USA, Deutschland und Norwegen werden weltweit am meisten Elektroautos verkauft (Center of Automotive Management, 2020). Aus diesem Grund sind diese vier Nationen Bestandteil der Analyse. Da die vorliegende Bachelorarbeit in der Schweiz geschrieben wird, ist dieser Markt ebenfalls zu berücksichtigen.

4.3 Nutzung benzingetriebenes Fahrzeug

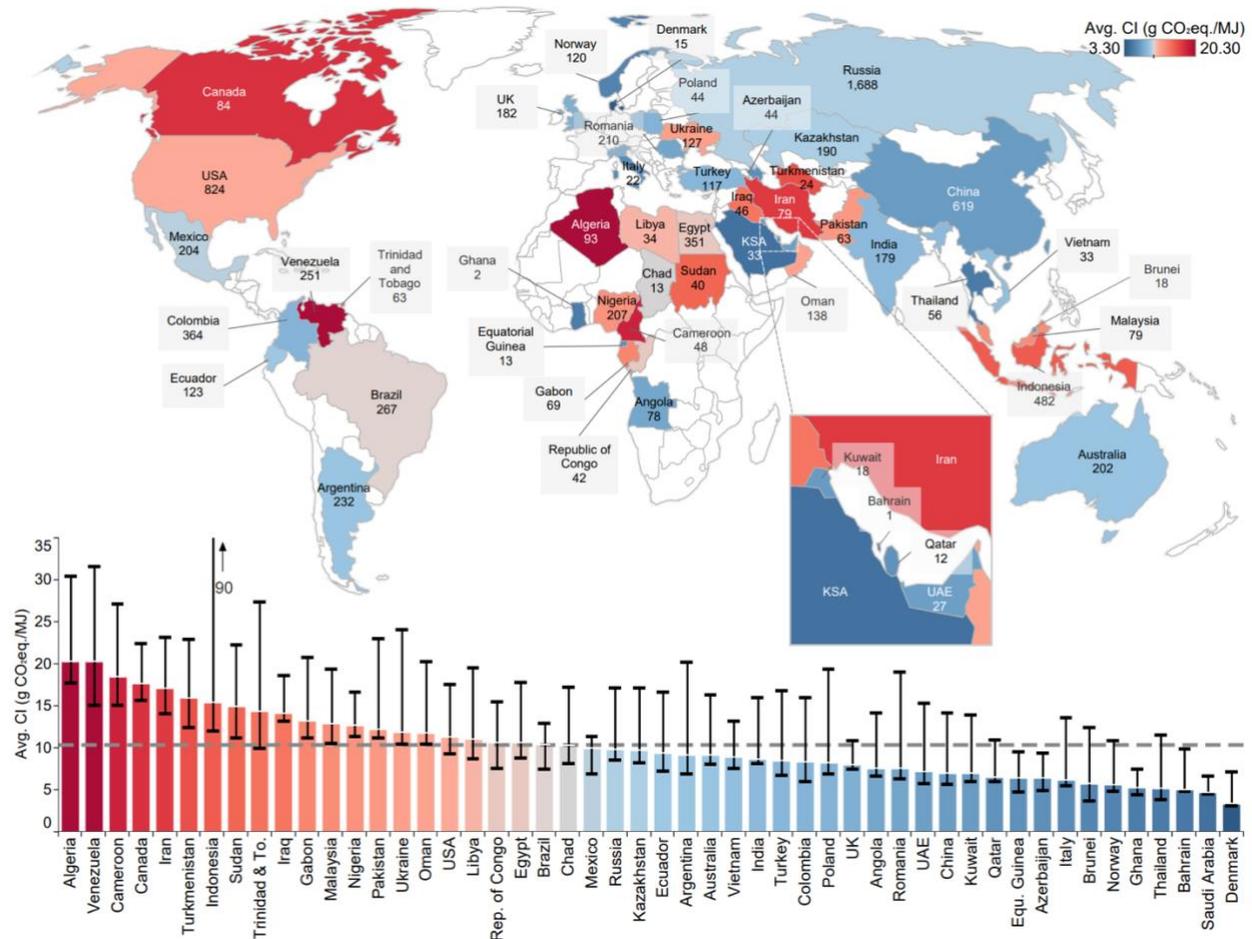
Um den gesamten CO₂-Ausstoss bei benzingetriebenen Fahrzeugen zu analysieren, darf nicht nur der direkte CO₂-Ausstoss, welcher durch das Bewegen des Fahrzeuges erzeugt wird berücksichtigt werden, sondern auch der indirekte Ausstoss, welcher bei der Benzinverarbeitung entsteht (Affeldt & Hüttmann, 2018). Wird der gesamte Prozess, von der Rohölförderung bis zur Verbrennung des Treibstoffes im Fahrzeug analysiert, wird von Well-to-Wheel gesprochen. Dieser Prozess wird in zwei Unterprozesse aufgeteilt. Der erste Unterprozess berücksichtigt jeden notwendigen Schritt, um das Rohöl vom Förderort via Raffinerie an die Tankstelle zu befördern. Dieser Schritt wird als Well-to-Tank bezeichnet (Di Lullo et al., 2017). Der zweite Unterprozess heisst Tank-to-Wheel und bezeichnet die Kraftstoffverbrennung im Fahrzeug, was der direkte CO₂-Ausstoss eines PKW ist (Di Lullo et al., 2017).

4.3.1 Well-to-Tank

Der Prozess Well-to-Tank beinhaltet alle notwendigen Schritte zur Treibstoffherstellung und wird in drei Abschnitten analysiert. Der erste Schritt ist die Rohölförderung und der Transport zur Raffinerie. Masnadi et al. (2018) führten dazu eine Studie durch und analysierten im Jahr 2015 8'966 in Betrieb befindliche Ölfelder in 90 verschiedenen Ländern. Diese Ölfelder repräsentieren ca. 98% der weltweiten Rohölproduktion (Masnadi et al., 2018a). Die Analyse umfasst alle wichtigen Ressourcenklassen und berücksichtigt die Treibhausgasemissionen verursacht durch Erforschung, Bohrung, Erschliessung, Produktion, Förderung, Oberflächenverarbeitung und Transport bis zum Einlass in die Raffinerie (Masnadi et al., 2018a). Abbildung 11 zeigt, wie viele

Emissionen in den einzelnen Ländern bei der Rohölförderung erzeugt werden. Der globale volumengewichtete Durchschnitt, welcher durch die horizontale gestrichelte Linie dargestellt ist, beträgt 10.3 g CO₂-Äq./Megajoule (MJ) Rohöl. Die Streuung zwischen verschiedenen Ländern ist hoch. Dabei variiert der CO₂-Ausstoss pro MJ gefördertem Rohöl auf Länderebene zwischen 3.3 g in Dänemark und 20.3 g in Algerien (Masnadi et al., 2018b).

Abbildung 11: Kohlenstoffintensität der globalen Rohölförderung aus 2015



Quelle: Masnadi et al., 2018b

Die Verarbeitung von Rohöl wird in drei Schritte aufgeteilt: Das sind die Rohölförderung, die Raffinerie und der Transport zu den Tankstellen.

Rohölförderung: Die allgemeine Einheit für Rohöle ist MJ, für ein besseres Verständnis wird diese in Liter umgerechnet. Ein Barrel Rohöl entspricht ca. 6'019 MJ (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020a). Ein Barrel beinhaltet 159 Liter, also entspricht 1 Liter 37.86 MJ.

Mit dieser Approximation werden die 10.3 g CO₂-Äq./MJ Rohöl von Masnadi et al. (2018) in g CO₂-Äq./Liter umgerechnet. Die untenstehende Rechnung zeigt, dass für jeden geförderten Liter Rohöl, bis er in der Raffinerie ankommt, bereits 390 g CO₂-Äq. ausgestossen werden.

$$10.3g \text{ CO}_2 \text{ Äq./MJ} * 37.86 \text{ MJ/Liter} = 390.0g \text{ CO}_2 \text{ Äq./Liter Rohöl}$$

Raffinerie: Der nächste Schritt in der Rohölverarbeitung ist das Raffinieren. Da für das Raffinieren und den Transport zu den Tankstellen nur Daten aus Europa gefunden wurden, werden diese in der Berechnung verwendet. Beim Raffinieren werden pro MJ Benzin 10.2 g CO₂-Äq. emittiert (Gordillo et al., 2018). Da Benzin einen anderen Umrechnungsfaktor von MJ in Liter besitzt als Rohöl, muss der Faktor angepasst werden. Ein Liter Benzin entspricht 33.54 MJ (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020a). So können die 10.2 g CO₂-Äq. pro MJ raffiniertem Benzin in Liter umgerechnet werden. Pro Liter, welcher raffiniert wird, werden folglich 342.1 g CO₂-Äq. emittiert.

$$10.2g \text{ CO}_2 \text{ Äq./MJ} * 33.54 \text{ MJ/Liter} = 342.1 \text{ g CO}_2 \text{ Äq./Liter Benzin}$$

Transport zu den Tankstellen: Der letzte Schritt, der für die Well-to-Wheel Berechnung berücksichtigt werden muss, ist der Transport des Benzins von der Raffinerie bis zur Tankstelle. Dieser benötigt in Europa im Schnitt ca. 1 g CO₂-Äq. pro MJ transportiertem Benzin (Edwards et al., 2011). Für die Umrechnung auf Liter kann die gleiche Approximation wie in der oben aufgeführten Berechnung verwendet werden, welche 33.54 MJ/Liter beträgt (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020a). So wird pro Liter transportiertem Benzin zu Tankstellen 33.5 g CO₂-Äq. emittiert.

$$1g \text{ CO}_2 \text{ Äq./MJ} * 33.54 \text{ MJ/Liter} = 33.5g \text{ CO}_2 \text{ Äq./Liter Benzin}$$

Total: Werden alle drei der oben aufgeführten Rechnungen addiert, ergibt das den Well-to-Tank für Benzin. Dieser ist 765.6 g CO₂-Äq./Liter Benzin. Das ist der Ausstoss, welcher emittiert wird, bis der Treibstoff Benzin vom Bohrloch an den Tankstellen ist. Pro Liter Benzin werden folglich 765.6 g CO₂-Äq. ausgestossen, bevor ein Fahrzeug ein Millimeter mit dem Treibstoff gefahren ist.

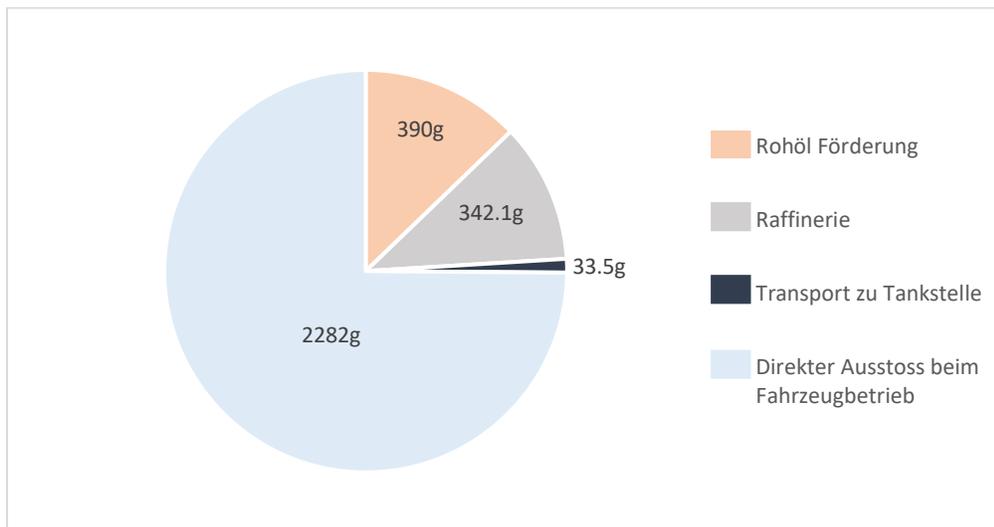
4.3.2 Tank-to-Wheel

Der zweite Schritt für die Well-to-Wheel Aufstellung ist die Tank-to-Wheel Berechnung. Bei dieser Berechnung wird analysiert, wie viel CO₂ das Fahrzeug beim Fahren ausstösst (Di Lullo et al., 2017). Dies bedeutet, es wird der direkte Ausstoss eines Fahrzeugs berechnet. Zu den Herstellerangaben für ein Fahrzeug gehört nicht nur der Verbrauch, sondern auch der CO₂-Ausstoss pro Kilometer (BMW Schweiz, 2020). Für das benzingetriebene Vergleichsfahrzeug, den BMW 330i xDrive, liegt dieser Ausstoss bei 178 g/km (BMW Schweiz, 2020). Um diesen Wert mit den Daten aus der Well-to-Tank Berechnung vergleichbar zu machen, wird berechnet, wie weit der BMW mit einem Liter Benzin fährt und wie viel CO₂ der BMW dabei ausstösst. Mit einem WLTP Verbrauch von 7.8 l/100 km (BMW Schweiz, 2020) kommt das Fahrzeug mit einem Liter Benzin 12.82 km weit. Während diesen 12.82 km stösst der BMW 2'282 g CO₂ aus (BMW Schweiz, 2020), was dem Tank-to-Wheel entspricht. Dies bedeutet, dass beim Fahren vom Fahrzeug pro Liter Benzin direkt 2'282 g CO₂ ausgestossen werden.

4.3.3 Well-to-Wheel

Der Vergleich der Daten aus den Well-to-Tank und Tank-to-Wheel Abschnitten zeigt, dass die Kraftstoffbereitstellung ca. ¼ und der direkte Ausstoss etwa ¾ der Emissionen von Well-to-Wheel verursachen. In Abbildung 12 ist zu sehen, wie sich die CO₂ Emissionen pro Liter Benzin zusammensetzen.

Abbildung 12: Anteil Ausstoss CO₂-Äq. für Benzin in Gramm pro Liter



Quellen: BMW Schweiz, 2020; Masnadi et al., 2018b; Gordillo et al., 2018; Edwards et al., 2011

Basierend auf den obenerwähnten Daten wird der CO₂-Ausstoss des BMW 330i pro Liter Benzin errechnet. Für die Kraftstoffbereitstellung werden total pro Liter 765.6 g CO₂-Äq. emittiert. Mit einem Liter Kraftstoff kann der BMW 330i eine Strecke von 12.82 km zurücklegen und stösst dabei durch die Kraftstoffverbrennung 2'282 g CO₂ aus.

$$765.6g CO_2 \text{ Äq.} + 2'282g CO_2 = 3'047.6g CO_2 \text{ Äq./Liter Benzin}$$

Diese 3'047.6 g CO₂-Äq. pro Liter entsprechen dem Well-to-Wheel für den BMW 330i xDrive. Somit emittiert das Fahrzeug in der Well-to-Wheel Berechnung pro gefahrenen Kilometer 237.7 g CO₂. Tabelle 6 zeigt die Well-to-Tank und die Well-to-Wheel Aufstellung sowie jeweils die dazugehörigen Schritte. Zusätzlich ist bei jedem Schritt aufgelistet, wie viel CO₂ pro Liter Benzin ausgestossen wird.

Tabelle 6: Zusammenfassung Well-to-Wheel

Prozessschritt	Ausstoss CO ₂ pro Liter Benzin in Gramm
Rohölförderung	390.0g
Raffinerie	342.1g
Transport zu Tankstellen	33.5g
Total Well-to-Tank	765.6g
Direkter Ausstoss Fahrbetrieb	2'282g
Total Well-to-Wheel	3'047.6g

Quellen: BMW Schweiz, 2020; Masnadi et al., 2018b; Gordillo et al., 2018; Edwards et al., 2011

4.4 Elektrofahrzeug Nutzung

Elektroautos (E-Autos) stossen lokal beim Fahren kein CO₂ aus (Pucher, 2020). Um den indirekten CO₂-Ausstoss von Elektrofahrzeugen zu bestimmen, muss berücksichtigt werden, wie der Strom produziert wird (Pucher, 2020). Aus diesem Grund werden die fünf definierten Absatzmärkte von Elektroautos (USA, China, Deutschland, Norwegen und die Schweiz) einzeln auf die CO₂-Intensität der Stromproduktion analysiert. Anhand dieser Daten wird der indirekte CO₂-Ausstoss eines Elektroautos errechnet.

4.4.1 Strommix USA

Die USA produziert einen Grossteil des Stroms aus fossilen Energieträgern (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020c). Genauer gesagt stammen 38.4% der Energie aus Erdgas und 23.5% aus Kohle. Von den nicht fossilen Energieträgern trägt Nuklearenergie mit 19.7% den grössten Anteil. Erneuerbare Energiequellen decken 17.5% des Energiebedarfs ab. Die exakte Aufteilung des Strommix der USA ist im Anhang in Abbildung 22 zu finden. Allerdings variiert die CO₂-Intensität der Stromproduktion zwischen den Bundesstaaten beträchtlich. Die USA wird aber als einheitlicher Markt angeschaut, weshalb nur der Durchschnittswert des ganzen Landes betrachtet wird. Laut der U.S. Energy Information Administration Behörde emittiert jede kWh produzierter Strom im Jahr 2018 0.99 Pfund CO₂ (U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020b). Werden die 0.99 Pfund in Gramm umgerechnet, ergibt das 449 g CO₂-Ausstoss pro kWh.

4.4.2 Strommix China

China deckt einen Grossteil des Strombedarfs aus Kohlenenergie (Energy Brainpool, 2017). Mit 67% Anteil der Gesamtenergieproduktion ist Kohle der grösste Energieträger in China, gefolgt von Wasserkraft mit 17.4% (Climate Transparency, 2019). Andere Energiequellen decken vergleichsweise einen geringen Anteil der Gesamtproduktion ab. Windenergie macht 5%, Kernkraftenergie 4% und Solarenergie 2.6% aus (Climate Transparency, 2019). Eine exakte Aufstellung der Energieträger ist im Anhang unter Abbildung 23 zu sehen. Durch den hohen Anteil an Kohleenergie ist der CO₂ Ausstoss der Stromproduktion in China hoch. Im Jahr 2018 betrug dieser 555 g CO₂ pro kWh.

4.4.3 Strommix Deutschland

Mit 35% der Gesamtenergieproduktion übernahmen erneuerbare Energieträger im Jahr 2018 in Deutschland den grössten Anteil der Stromproduktion. Braunkohle liegt mit 22.5% direkt dahinter. Weiter machen mit je 12.9 % Steinkohle und Erdgas weitere Anteile der Stromproduktion aus. Kernenergie deckt 11.8% der Stromproduktion in Deutschland (Statistisches Bundesamt, 2019). Die detaillierte Aufstellung ist im Anhang in Abbildung 24 zu sehen. In den Analysen des Statistischen Bundesamt ist zu erkennen, dass der Anteil an erneuerbaren Energiequellen stetig steigt. Dies bedeutet, dass zukünftig pro kWh weniger CO₂ ausgestossen wird. Im Jahr 2018 produzierte jede erzeugte kWh Strom 468g CO₂ (Umwelt Bundesamt, 2020).

4.4.4 Strommix Norwegen

Norwegen produziert den Strom fast ausschliesslich aus erneuerbaren Energiequellen. Im Jahr 2018 stammten 95% der Energie aus Wasserkraft. Wind mit 2.5% und Biogas mit 1.8% sind die Energiequellen, die den zweit- und drittgrössten Anteil der Stromproduktion ausmachen (International Energy Agency, 2019). Allerdings machen diese beiden Energiequellen im Vergleich zur Wasserkraft nur einen sehr kleinen Anteil aus. Eine gesamte Aufstellung der Energieproduktion aus Norwegen ist im Anhang in Abbildung 25 zu finden. Als Konsequenz der nachhaltigen Stromproduktion stösst diese in Norwegen, verglichen zu anderen Ländern, nur wenig CO₂ aus. Im Jahr 2018 betrug der CO₂-Ausstoss pro kWh 18.9 g (Norwegian Water Resources and Energy Directorate, 2018).

4.4.5 Strommix Schweiz

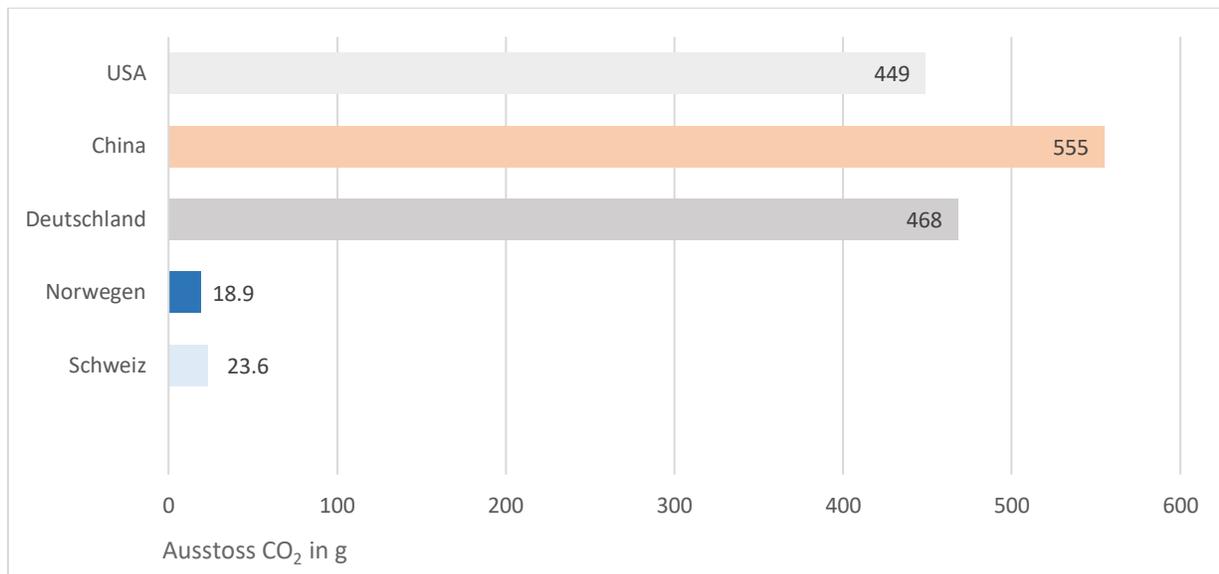
In der Schweiz wurde 2018 66% des produzierten Stroms aus Grosswasserkraft gewonnen (Bundesamt für Energie, 2020). Der zweitgrösste Energieträger ist mit 17% die Kernenergie gefolgt von anderen erneuerbaren Energiequellen wie Wind- oder Sonnenenergie, welche zusammen einen Anteil von 8% ausmachen (Bundesamt für Energie, 2020). Die exakte Aufstellung ist im Anhang in Abbildung 26 zu sehen. Da in der Schweiz der grösste Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen stammt, ist die CO₂-Belastung im Vergleich zu anderen Nationen gering. Im Jahr 2018 waren es 23.6 g CO₂ pro kWh Strom (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018).

4.4.6 Zusammenfassung Stromproduktion

Wie der vorgehenden Analyse zu entnehmen ist, variiert die CO₂-Intensität der Stromproduktion der einzelnen Länder signifikant. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für die spätere Berechnung des indirekten CO₂-Ausstosses eines Elektrofahrzeugs. Abbildung 13 zeigt, wie CO₂-intensiv die analysierten Staaten den Strom produzieren. Die Werte liegen zwischen 18.9 g CO₂ pro kWh in Norwegen und 555 g CO₂ pro kWh in China. Mit einem Ausstoss von 23.6 g CO₂ pro kWh verzeichnet die Schweiz ebenfalls eine CO₂-arme Stromproduktion im Vergleich zu anderen Nationen. Die USA und Deutschland mit 449 g CO₂, beziehungsweise 468 g CO₂ pro kWh, emittieren weniger CO₂ als China aber deutlich mehr als die Schweiz und Norwegen. Für den emittierten CO₂-Ausstoss ist entscheidend, wie viel Prozent des produzierten Stroms aus

erneuerbaren Energien und wie viel aus fossilen Energiequellen stammen, was Abbildung 13 deutlich zeigt.

Abbildung 13: Grafik CO₂-Intensität der Stromproduktion 2018 in Gramm pro kWh



Quellen: U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020b; Climate Transparency, 2019; Umwelt Bundesamt, 2020; Norwegian Water Resources and Energy Directorate, 2018; Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018

4.4.7 Anwendung der Resultate

Werden die Erkenntnisse aus Abschnitt 4.4.6 auf das Tesla Model 3 angewendet, kann errechnet werden, wie viel CO₂ für eine Vollladung im jeweiligen Land ausgestossen wird. Dieses Resultat wird später für den Vergleich mit dem benzingetriebenen Fahrzeug verwendet. Das Tesla Model 3 long range besitzt eine Akkukapazität von 75 kWh (Tesla, 2020). Das Produkt aus dem CO₂-Ausstoss pro kWh produziertem Strom und der Akkukapazität eines Fahrzeuges ergibt den CO₂-Ausstoss pro Ladung. Wie Tabelle 7 zu entnehmen ist, unterscheidet sich der CO₂-Ausstoss für eine Vollladung stark zwischen verschiedenen Ländern. Norwegen schneidet im Vergleich am umweltfreundlichsten ab, während in China für eine Ladung am meisten CO₂ emittiert wird. Für das Tesla Model 3, mit einer Akkukapazität von 75 kWh, verursacht eine Vollladung in Norwegen 1.4 kg CO₂, in China mit 41.6 kg CO₂ knapp das 30-fache.

Tabelle 7: CO₂-Ausstoss pro Vollladung nach Ländern

Land	CO ₂ Ausstoss in kg für eine Vollladung des 75 kWh Tesla Model 3 Akkus
USA	33.675
China	41.625
Deutschland	35.1
Norwegen	1.418
Schweiz	1.77

Quellen: U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020b; Climate Transparency, 2019; Umwelt Bundesamt, 2020; Norwegian Water Resources and Energy Directorate, 2018; Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018

4.5 Zusammenfassung Fahrzeugnutzung

Anhand der Ergebnisse aus den Abschnitten 4.3 und 4.4 wird ein Vergleich gezogen, wie viel Gramm CO₂ die jeweiligen Fahrzeuge pro gefahrenen Kilometer ausstossen. Im Falle des Elektroautos muss dabei zwischen den verschiedenen Ländern, in denen das Fahrzeug verwendet wird, unterschieden werden. Der BMW 330i stösst in der Nutzungsphase direkt und indirekt total 237.7 g CO₂ pro gefahrenen Kilometer aus. Ein Tesla Model 3 long range kann mit einer Akkuladung eine Strecke von 560 km zurücklegen. Werden somit die Werte aus Tabelle 7 durch 560 km dividiert, ergibt dies den indirekten CO₂ Ausstoss des Elektrofahrzeuges pro Kilometer. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Vergleich CO₂ Ausstoss g/km

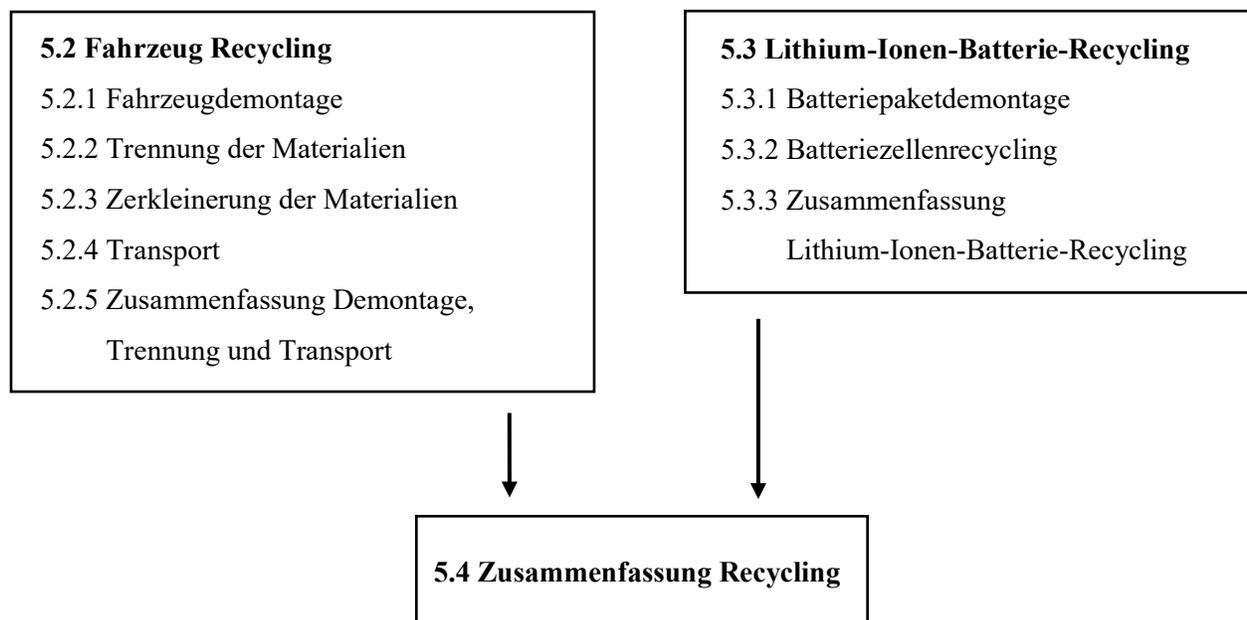
Fahrzeug	CO ₂ Ausstoss in g/km
BMW 330i xDrive	237.7
Tesla Model 3 in der USA	60.1
Tesla Model 3 in China	74.3
Tesla Model 3 in Deutschland	62.7
Tesla Model 3 in Norwegen	2.5
Tesla Model 3 in der Schweiz	3.2

5. Recycling

5.1 Erläuterung Recyclingabschnitt

Bei Untersuchung des Fahrzeugrecyclings muss dieselbe Unterscheidung wie in der Herstellung gemacht werden. Ein Lithium-Ionen-Akkupaket eines Elektrofahrzeugs kann nicht herkömmlich recycelt werden (Hoyer, 2015). Für die Recycling-Berechnungen wird wie im Produktionsteil das GREET 2 Modell (Argonne National Laboratory, 2019) als Grundlage verwendet. Hierbei wird angenommen, dass bei einer Zunahme des Fahrzeuggewichtes jede einzelne Fahrzeugkomponente prozentual gleich viel schwerer wird. So kann im Recycling Abschnitt anhand des Fahrzeuggewichtes auf den Tesla und den BMW geschlossen werden. Das Akkupaket des Tesla wird in diesem Abschnitt separat behandelt. Abbildung 14 erläutert den Aufbau des Recycling Abschnittes.

Abbildung 14: Ablauf Abschnitt Recycling



5.2 Fahrzeug Recycling

Zur CO₂-Intensität im Fahrzeugrecycling Prozess sind lediglich Daten aus dem Jahr 2001 vorhanden. Für die Berechnungen muss deswegen angenommen werden, dass sich das Fahrzeugrecycling bis heute nicht entscheidend verändert hat. Der Recycling Prozess wird in verschiedene Schritte unterteilt (Kanari et al., 2003), welche Demontage, Trennung der Materialien, Zerkleinerung und Transport umfassen (Mas Alique & Munoz Jimenez, 2013).

Staudinger und Keoleian (2001) untersuchen, wie viel Energie die einzelnen Prozessschritte im Automobilrecycling in den USA verbrauchen. Anhand des Energieverbrauchs kann der damit verbundene CO₂-Ausstoss errechnet werden. In der Quelle von Staudinger und Keoleian (2001) sind die Zahlen für die Energienutzung in kJ/kg angegeben. Für ein besseres Verständnis werden diese für die untenstehenden Abschnitte in kWh/kg umgerechnet. Die Umrechnung ist in Tabelle 9 aufgeführt.

5.2.1 Fahrzeugdemontage

Die Demontage eines Fahrzeuges ist arbeitsintensiv. Demontagebetriebe verwenden eine Vielzahl von Geräten wie druckluftbetriebene Werkzeuge, Schlagkerben, Handwerkzeuge, oder Sägen (Staudinger & Keoleian, 2001). Die meisten Demontagen erfordern vor allem menschliche Energie. Die einzige signifikante Stromnutzung dabei geschieht während dem Zusammenpressen der ausgeräumten Rohkarosserie. Dieser Schritt benötigt 0.001 kWh/kg. Für die sonstigen eingesetzten Geräte rechnen Staudinger und Keoleian (2001) mit 0.0001 kWh/kg, was in der Fahrzeugdemontage ein total von 0.0011 kWh/kg ergibt.

5.2.2 Trennung der Materialien

Die Trennungsenergie variiert je nach Art der abgetrennten Materialien und dem Verfahren der durchgeführten Trennung. Der typische Energiebedarf für die Trennung der leichten Medien sind 0.018 kWh/kg. Die Trennung der schweren Medien bedarf 0.047 kWh/kg Strom (Staudinger & Keoleian, 2001). Da beide Schritte für eine angemessene Trennung erforderlich sind, benötigt das Trennen pro kg Material 0.0655 kWh (Staudinger & Keoleian, 2001).

5.2.3 Material Zerkleinerung

Die Zerkleinerung von Fahrzeugteilen in faustgrosse Stücke mittels eines Schredders ist mit einem erheblichen Aufwand an elektrischer Energie verbunden (Staudinger & Keoleian, 2001). Die Zerkleinerungsenergie variiert in Abhängigkeit von der Belastung (Tonnen/Stunde) und dem Leistungsbedarf des Schreddermotors. Die Zerkleinerungsenergie umfasst das Zerkleinern und die magnetische Trennung von eisenhaltigen Materialien. Laut Staudinger und Keoleian (2001) werden pro kg geschreddertes Material 0.0277 kWh Strom benötigt.

5.2.4 Transport

Im Zusammenhang mit Personenwagen-recycling wurden drei wichtige verkehrsbedingte Belastungen erfasst (Staudinger & Keoleian, 2001):

- Transport zerlegter Fahrzeugteile zur Schredderanlage
- Transport von zurückgewonnenen Metallen zur Metallverarbeitung
- Transport von nichtverwertbaren Materialien zu Entsorgungsdeponien

Diese Studie wurde in den USA durchgeführt, wobei dort die Transportwege deutlich länger sein können als in anderen Ländern. In den USA benötigen alle Transportwege total 665 kJ/kg transportiertem Material (Staudinger & Keoleian, 2001).

5.2.5 Zusammenfassung Demontage, Trennung und Transport

In Tabelle 9 sind die Werte der Abschnitte zum Recycling zusammengefasst. Um die Werte mit den bisherigen Zahlen verrechnen zu können, wird zusätzlich die Einheit kJ in kWh umgerechnet. Der Transportprozess benötigt am meisten Energie, gefolgt vom Prozess der Materialtrennung. Der Transportprozess wird nicht in kWh umgerechnet, da angenommen wird, dass dieser mittels Lastkraftwagen (LKW) über den Strassenweg stattfindet und LKWs Treibstoff und nicht Strom benötigen.

Tabelle 9: Prozesse Fahrzeugrecycling

Prozessschritt	benötigte Energie in kJ pro kg Material	Umgerechnet in kWh/kg
Demontage	4	0.0011
Materialtrennung	236	0.0655
Materialzerkleinerung	100	0.0277
Transport	665	-
Total	1005	0.0944

Quelle: Staudinger & Keoleian, 2001

Auf Basis der errechneten Zahlen und dem Fahrzeuggewicht der beiden Vergleichsfahrzeuge kann der damit verbundene CO₂-Ausstoss berechnet werden. Die Daten aus Abbildung 13 bilden hierfür die Grundlage, sodass die CO₂-Intensität für das Fahrzeugrecycling, ausgenommen das Akkupaket beim Elektroauto, errechnet werden kann. Für den BMW mit einem Gewicht von 1640 kg benötigt das Recycling ohne den Transportprozess 155 kWh Strom. Das Tesla Model 3 ohne Akkupaket

wiegt 1369 kg und benötigt folglich für den gesamten Recyclingprozess 129 kWh Strom. Tabelle 10 illustriert, wie viel CO₂ in den einzelnen Ländern für den gesamten Recyclingprozess (Demontage, Materialtrennung und Materialzerkleinerung) durch die Stromproduktion verursacht wird.

Tabelle 10: CO₂ Ausstoss Recycling ausgenommen Transport länderspezifisch

Fahrzeug	Land	kWh Strom für Recycling Prozesse Demontage, Materialtrennung, Materialzerkleinerung	damit verbundener CO ₂ -Ausstoss*
Tesla Model 3	USA	129 kWh	57.9 kg
	China	129 kWh	71.6 kg
	Deutschland	129 kWh	60.4 kg
	Norwegen	129 kWh	2.4 kg
	Schweiz	129 kWh	3.0 kg
BMW 330i	USA	155 kWh	69.6 kg
	China	155 kWh	86.0 kg
	Deutschland	155 kWh	72.5 kg
	Norwegen	155 kWh	2.9 kg
	Schweiz	155 kWh	3.7 kg

*Der CO₂-Ausstoss ergibt sich mittels benötigten Stroms multipliziert mit den Werten aus Abbildung 13

Der Transport wird separat betrachtet, da dieser kein Strom benötigt, sondern Treibstoff für den LKW. Staudinger und Keoleian (2001) nehmen an, dass 75% der Fahrzeugteile im Recyclingprozess transportiert werden, was in Tabelle 11 in Betracht gezogen wird. Dabei ist anzunehmen, dass der Transport mittels LKWs ausgeführt wird. Für diesen Prozessschritt werden die 665 kJ/kg in Diesel Treibstoff für die LKWs umgerechnet. Ein Liter Diesel beinhaltet ein Energieäquivalent von 35'244 kJ (Bundesamt für Energie BFE, 2018). Tabelle 11 veranschaulicht, wie viele Liter Diesel für den Transport des Fahrzeugschrotts aufgewendet und wie viel kg CO₂ damit ausgestossen wird. Ein Liter Diesel verursacht bei der Verbrennung 2.6 kg CO₂ (Esser, 2016). Dazu muss noch der CO₂-Ausstoss aus der Dieselproduktion addiert werden. Dabei werden die Erkenntnisse aus Abschnitt 4.3.1 verwendet. Dies ergibt Emissionen von 3.366 kg CO₂ pro Liter Diesel. Mit dieser Zahl wird die Literanzahl Diesel auf den CO₂-Ausstoss umgerechnet, was in untenstehender Tabelle zu sehen ist.

Tabelle 11: Transport im Recyclingprozess

Fahrzeug	Gewicht in kg für Recycling Transport, 75% von Gesamtgewicht	Energiebedarf in Liter Diesel	CO ₂ Ausstoss in kg
Tesla Model 3 ohne Akkupaket	1369 x 0.75 = 1027	19.4	65.3
BMW 330i	1640 x 0.75 = 1239	23	77.4

$$\text{Energiebedarf Transport Tesla Recycling} = \frac{665 \text{ kJ/kg} * 1027 \text{ kg}}{35'244 \text{ kJ/l}} = 19.4 \text{ Liter}$$

$$\text{Energiebedarf Transport BMW Recycling} = \frac{665 \text{ kJ/kg} * 1239 \text{ kg}}{35'244 \text{ kJ/l}} = 23 \text{ Liter}$$

5.3 Lithium-Ionen-Batterie-Recycling

Arbeiten über die Umweltauswirkungen des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien sind spärlich. Eine Studie von Romare und Dallhöf (2017) zeigt die CO₂- und Energie-Intensität des Recyclingprozesses auf, allerdings wird nicht unterschieden, wo die Batterien recycelt werden. Momentan steht ein geringes Batterievolumina für das Recycling bereit, da Elektrofahrzeuge erst seit den letzten knapp zehn Jahren in grossen Mengen auf dem Markt sind und die Batterien somit noch nicht das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben (Romare & Dahllöf, 2017). Sobald mehr Lithium-Ionen-Batterien für das Recycling zur Verfügung stehen, können Ressourcen bei der Produktion eingespart werden, da Bestandteile des Akkus aus recycelten Batterien wiederverwendet werden können und nicht neu abgebaut werden müssen (Dunn et al., 2015). Der Recyclingprozess der Lithium-Ionen-Batterien im Automobilbau kann in folgende Schritte unterteilt werden: Demontage und Batteriezellenrecycling (Romare & Dahllöf, 2017).

5.3.1 Batteriepaketedemontage

Bei diesem Prozessschritt werden die Batteriezellen und das Gehäuse getrennt (Hoyer, 2015). Dabei können die für das Batteriegehäuse verwendeten Materialien wie Stahl, Aluminium oder Plastik zurückgewonnen werden (Romare & Dahllöf, 2017). Der damit verbundene CO₂-Ausstoss stammt vom Transport und vom Verarbeiten der Metalle. Bei diesem Schritt werden pro recyceltem kg Batteriepaket 234 g CO₂ emittiert (Romare & Dahllöf, 2017).

5.3.2 Batteriezellenrecycling

Bei diesem Verfahren werden die Batteriezellen auseinander gebaut. Die Verbrennung von nicht wiederverwertbaren Teilen führt zu einem gewissen CO₂-Ausstoss. Allerdings ermöglicht dieser Prozessschritt auch Kupfer, Aluminium, Kobalt und Nickel aus den Zellen zu extrahieren (Hoyer, 2015). Die Bergung dieser Materialien aus alten Batteriepaketen ist mit einem hohen CO₂-Ausstoss verbunden. Allerdings wird durch diesen Schritt ermöglicht, dass im Bergbau weniger Materialien abgebaut werden müssen (Romare & Dahllöf, 2017). Wie im Abschnitt Produktion erläutert, ist der Abbau von Rohmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien mit einer hohen CO₂-Belastung verbunden, welche durch das Recyceln von Kupfer, Aluminium, Kobalt und Nickel reduziert werden kann. Im Anhang in Abbildung 27 ist eine genaue Aufstellung zu sehen, wie viel CO₂ so beim Abbau gespart werden kann. Für die Analyse wird allerdings nur der CO₂-Ausstoss des Recyclings berücksichtigt, nicht aber die möglichen Einsparungen bei der Produktion. Beim Recycling der Batteriezellen entstehen pro kg wiederverwerteter Batterie 2'260 g CO₂-Äq. (Romare & Dahllöf, 2017).

5.3.3 Zusammenfassung Lithium-Ionen-Batterie-Recycling

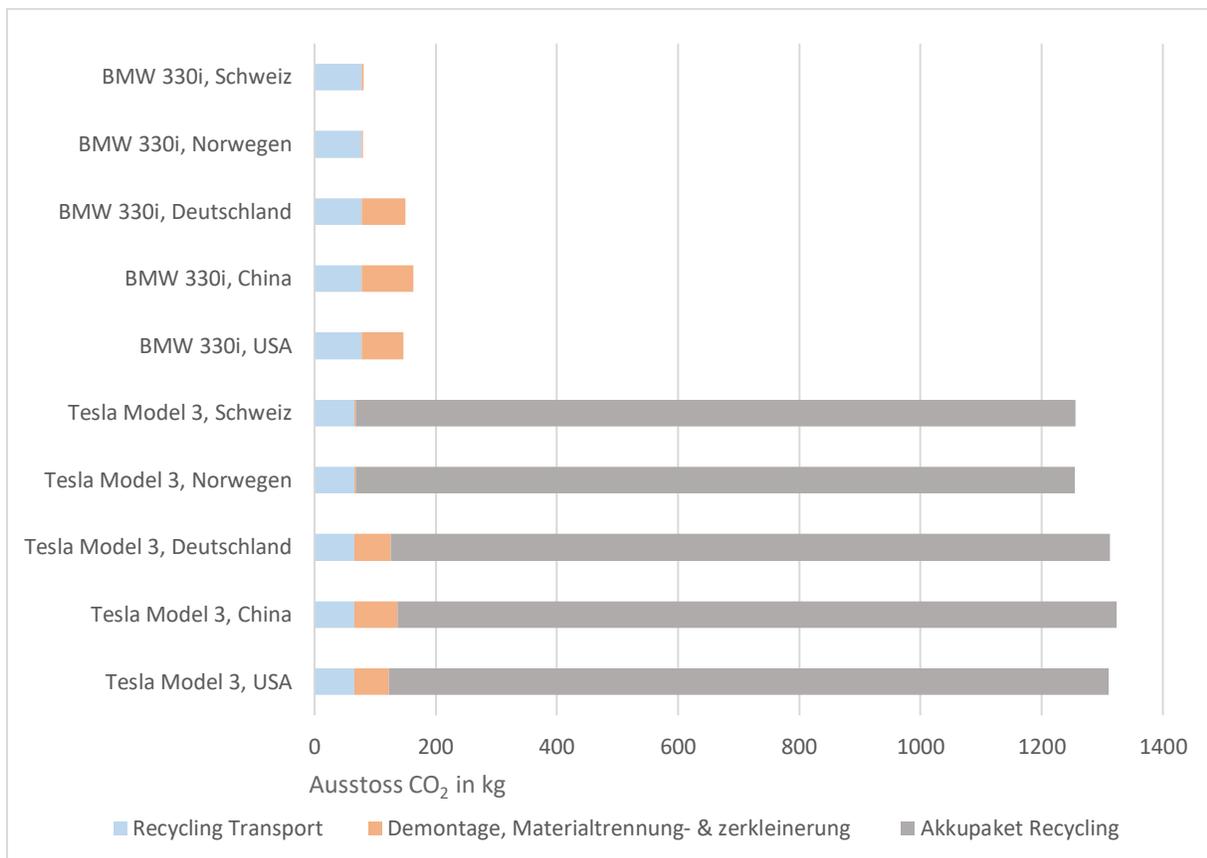
Durch Addition der Daten aus den Prozessschritten Demontage und Batteriezellenrecycling ergibt sich, dass pro kg wiederverwerteter Batterien total 2'494 g CO₂-Äq. emittiert werden. Für das Tesla Model 3, mit einer 476 kg schweren Batterie, entsteht während dem Recyclingprozess 1'187 kg CO₂-Äq. Allerdings sollte laut Romare und Dallhöf (2017) in diesem Bereich noch deutlich mehr geforscht werden, um verlässlichere und genauere Daten zu generieren.

5.4 Zusammenfassung Recycling

Mittels alle oben aufgeführten Daten wird errechnet, wie viel CO₂ durch das Recycling vom Tesla Model 3 und vom BMW 330i verursacht wird. Im Recyclingprozess wird der CO₂-Ausstoss der Schritte Demontage, Materialtrennung und Materialzerkleinerung länderspezifisch betrachtet, da diese Prozessschritte Strom benötigen. Der Prozessschritt Transport benötigt Treibstoff, weshalb der dadurch entstandene CO₂-Ausstoss für alle Länder gleich berechnet wird. Die Erkenntnisse aus dem Abschnitt Lithium-Ionen-Batterie-Recycling betreffen nur den Tesla. In Abbildung 15 ist deutlich zu sehen, dass das Recycling des Akkupakets am meisten CO₂ ausstösst, da dies sehr energieintensiv ist. Der tiefste Wert in Abbildung 15 repräsentiert den CO₂-Ausstoss, welcher

durch das Recycling des BMWs in Norwegen verursacht wird. Dieser Prozess emittiert 80 kg CO₂. Der höchste Ausstoss wird durch das Recycling des BMWs in China mit 163 kg CO₂ hervorgerufen. Verglichen mit dem CO₂-Ausstoss, der durch das Recycling eines Lithium-Ionen-Batteriepaketes verursacht wird, ist dieser Wert tief. Am umweltfreundlichsten ist der Recyclingprozess des Tesla Model 3 in Norwegen, wodurch 1'255 kg CO₂ emittiert werden. Diese Summe ist so hoch, da alleine durch die Arbeitsschritte des Batterierecycling 1'187 kg CO₂ ausgestossen werden.

Abbildung 15: CO₂-Ausstoss in kg für das Fahrzeugrecycling



6. Ergebnisse der Life Cycle Analyse

Um die Ergebnisse aus der Life Cycle Analyse zu vergleichen, wird die Länge eines Autolebens definiert. Ein Autoleben erklärt die zurückgelegten Kilometer eines Fahrzeugs, bevor dieses verschrottet und recycelt wird. Die Fahrzeuglebensdauer wird mittels der Drei-Punkte-Schätzung errechnet. Hierbei wird der minimale und der maximale Wert einfach gewichtet und der realistische Wert vierfach.

Drei-Punkte-Schätzung Fahrzeuglebensdauer

Tabelle 12: Dreipunkte Schätzung Fahrzeuglebensdauer

Minimal	Realistisch	Maximal
120'000 km	250'000 km	680'000 km

Quellen: Focus online, 2018; Bamert, 2020

$$\text{Fahrzeuglebensdauer} = \frac{120'000\text{km} + (4 * 250'000\text{km}) + 680'000\text{km}}{6} = 300'000\text{km}$$

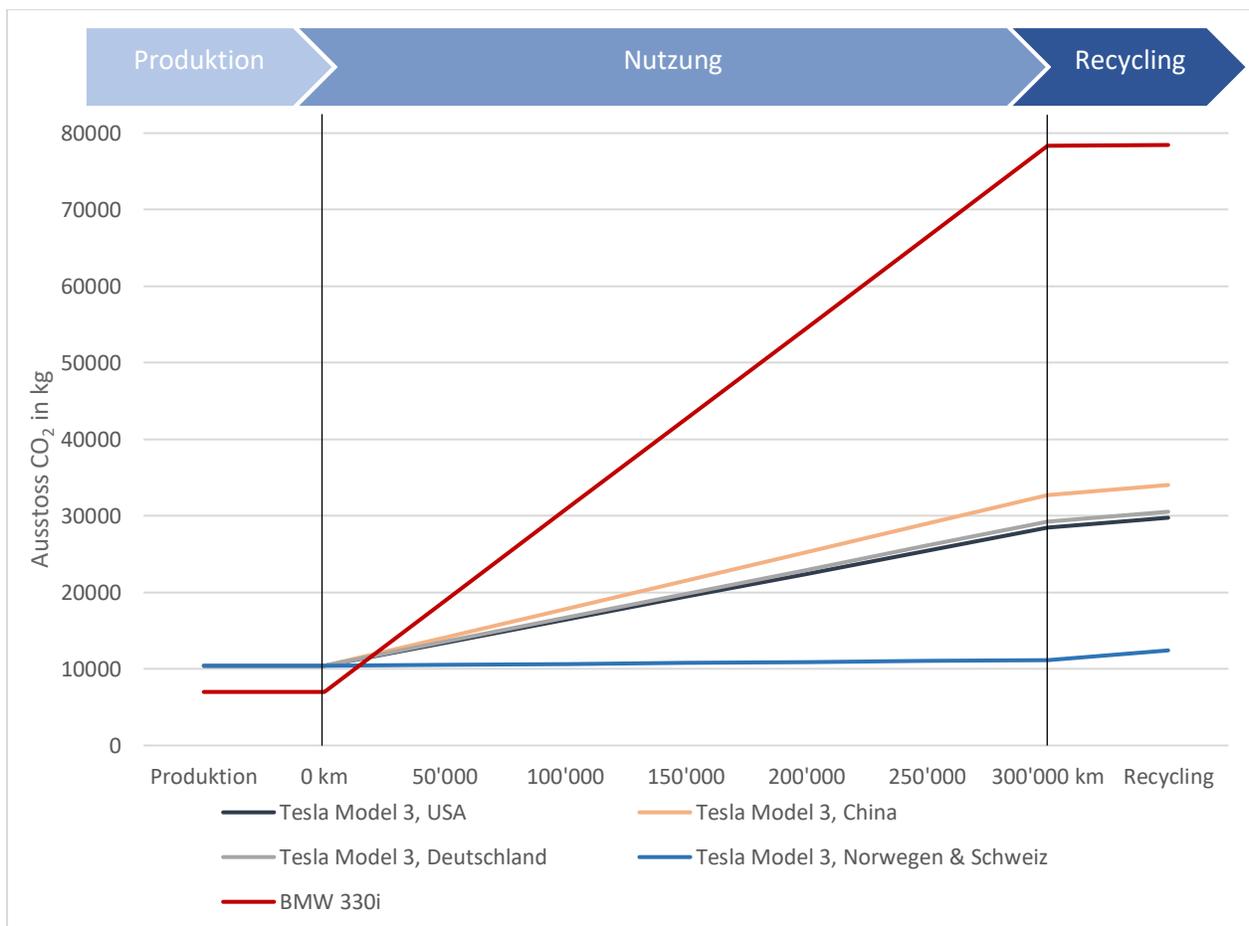
Mittels der Berechnung ergibt sich eine geschätzte Fahrzeuglebensdauer von 300'000 km. Die Lebensdauer wird sowohl für das Benzin- wie auch für das Elektroauto verwendet. Da Elektroautos noch nicht lange auf dem Markt sind, ist über deren Langlebigkeit wenig zu finden. Allerdings sind schon einige Tesla Model S bekannt, die über 500'000 km gefahren sind. Im Jahr 2019 hat eines sogar die eine Million gefahrene Kilometer erreicht (Manager Magazin, 2019); (Clean Technica, 2019). Daraus lässt sich schliessen, dass die potenzielle Lebensdauer von Elektroautos durch den weniger komplexen Antriebsstrang im Vergleich zu Verbrennungsfahrzeugen höher ist. Da dies aber noch nicht wissenschaftlich gestützt werden konnte, wird in der vorliegenden Arbeit bei dem Elektroauto ebenfalls mit einer Lebensdauer von 300'000 km gerechnet.

6.1 Anwendung der Resultate

Die Länder, welche in der Legende von Abbildung 16 und Abbildung 17 aufgeführt sind, beziehen sich auf den jeweiligen Markt, in welchem das Elektroauto gefahren wird. Da Tesla die Batteriepakete für ihre Fahrzeuge selber herstellt und die dazu nötige Energie fast ausschliesslich aus erneuerbaren Energiequellen stammt, wird von den drei Szenarien in Abbildung 9 das Bestmögliche gewählt. Abbildung 16 zeigt eindeutig, wie viel mehr CO₂ ein Fahrzeug mit

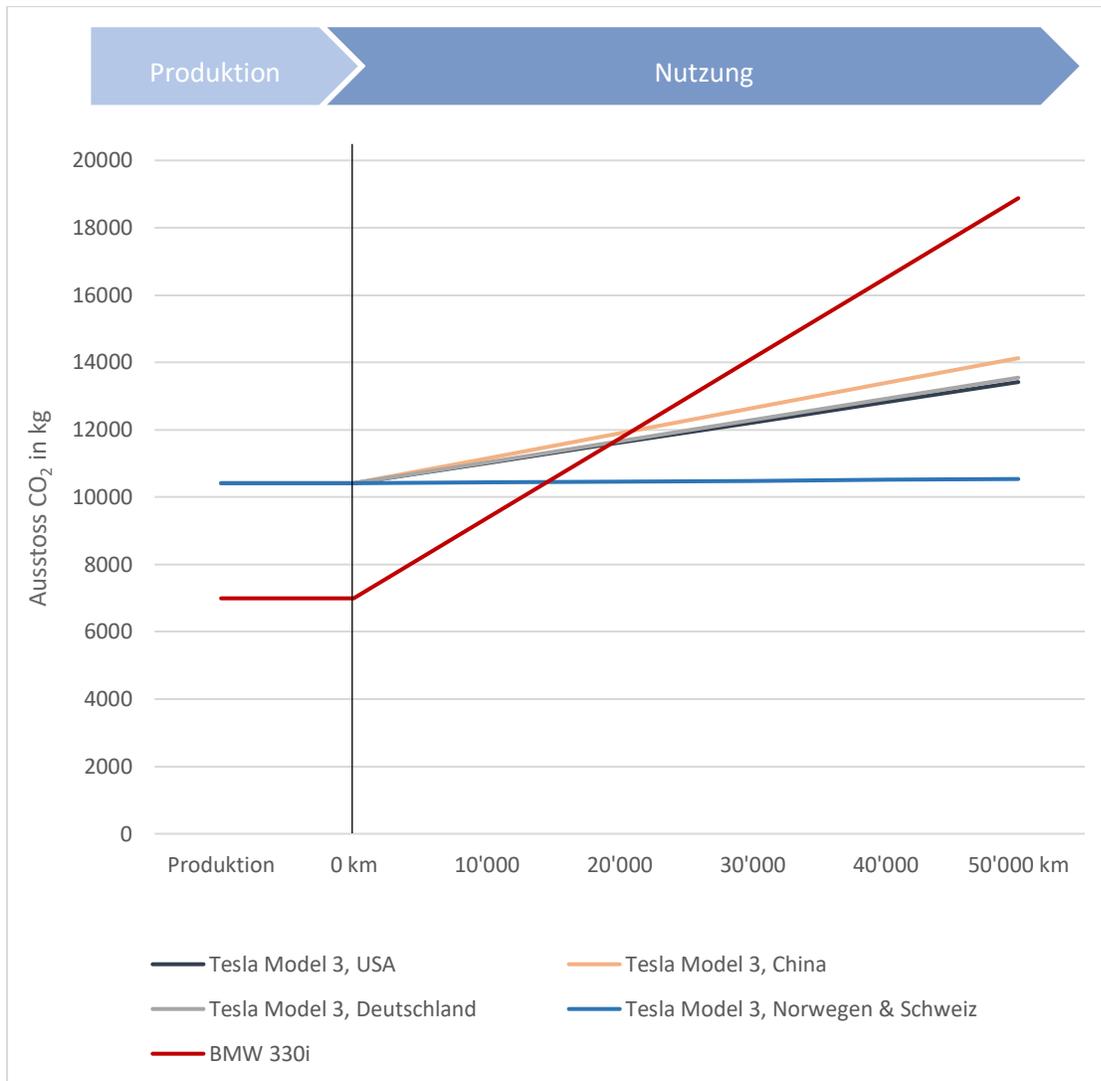
Verbrennungsmotor über den ganzen Life Cycle ausstösst. Da die Stromproduktion in Norwegen und der Schweiz in Bezug auf den CO₂-Ausstoss sehr ähnlich ist, wird dies im Diagramm in einer Linie dargestellt. Würden diese beiden Nationen getrennt aufgeführt werden, wären die Linien im Diagramm überlappend. Die Grafik verdeutlicht, dass die Produktion und das Recycling eines Elektroautos, verglichen zum Benzinfahrzeug, mehr CO₂ emittiert. Allerdings sind die CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor während der Nutzungsphase deutlich höher, sodass dieses bereits nach wenig gefahrenen Kilometern mehr CO₂ ausstösst. Nach 300'000 gefahrenen Kilometer des BMWs werden insgesamt, über den ganzen Life Cycle betrachtet, 78'451 kg CO₂ ausgestossen. Im Vergleich dazu emittiert ein Tesla Model 3 selbst im schlechtesten Szenario (Markt China) nach derselben Strecke 34'027 kg CO₂, im Bestmöglichen (Markt Norwegen) lediglich 12'418 kg CO₂. In China, Deutschland und in den USA ist das Tesla Model 3 nach etwa 20'000 gefahrenen Kilometern umweltfreundlicher. In Norwegen und in der Schweiz, wo der Strom deutlich CO₂-ärmer produziert wird, ist dies nach ca. 14'500 km der Fall.

Abbildung 16: Life Cycle Analyse



Um zu verdeutlichen, wie schnell die Linie für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor ansteigt, werden in Abbildung 17 der Produktionsschritt und die ersten 50'000 gefahrenen Kilometer nochmals vergrössert dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass Abbildung 16 und Abbildung 17 dieselben Daten repräsentieren.

Abbildung 17: Life Cycle Analyse Grösser

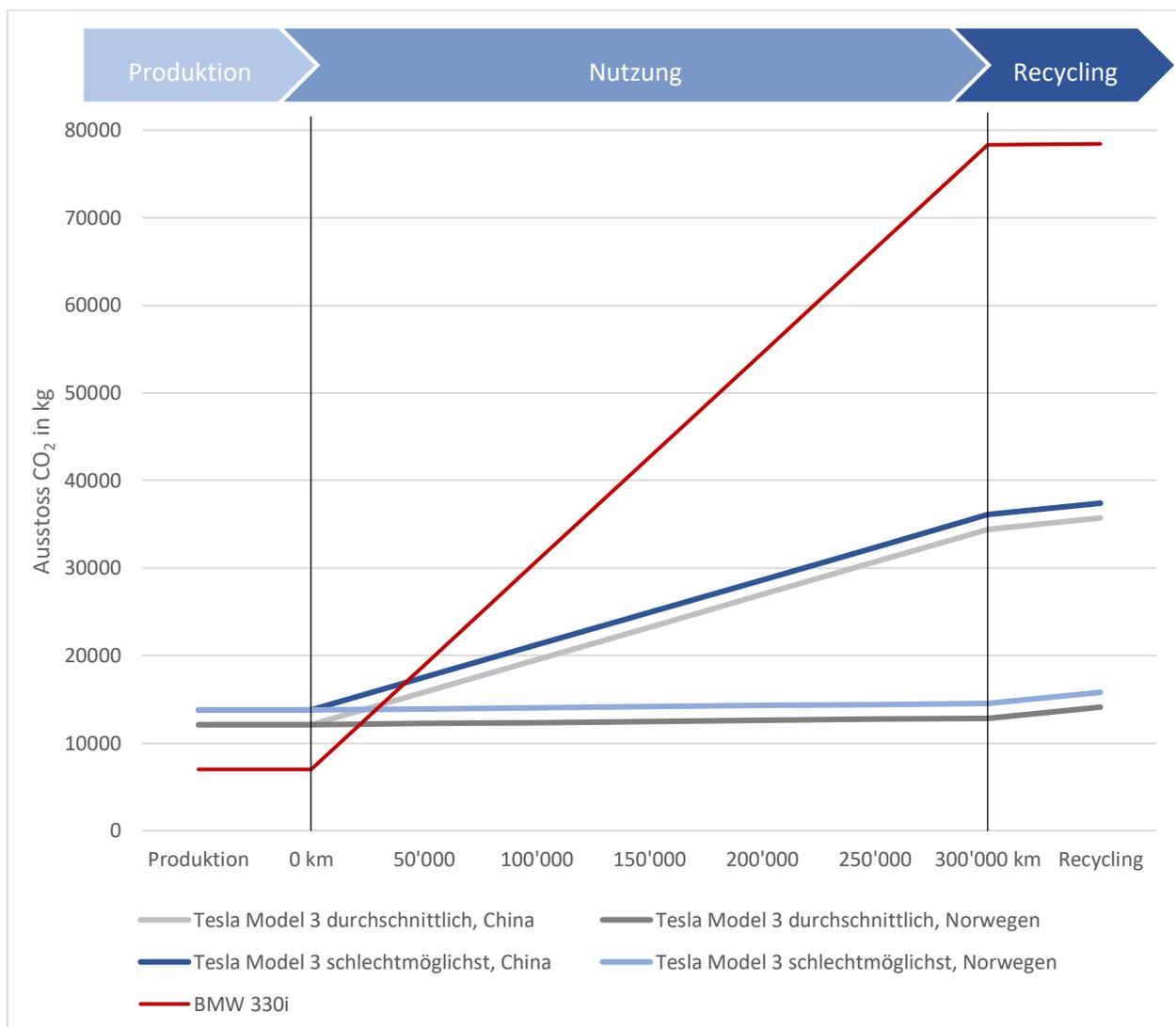


6.2 Allgemeine Anwendung der Resultate

Tesla deckt die Energieversorgung der Akkupaketproduktion über erneuerbare Energien, weshalb in Abbildung 16 und Abbildung 17 mit dem bestmöglichen Szenario für die Akkuproduktion gerechnet wird. Um zu illustrieren, wie sich ein Elektrofahrzeug bezüglich des CO₂-Ausstosses im durchschnittlichen oder schlechtesten Produktionsszenario gegenüber einem herkömmlichen

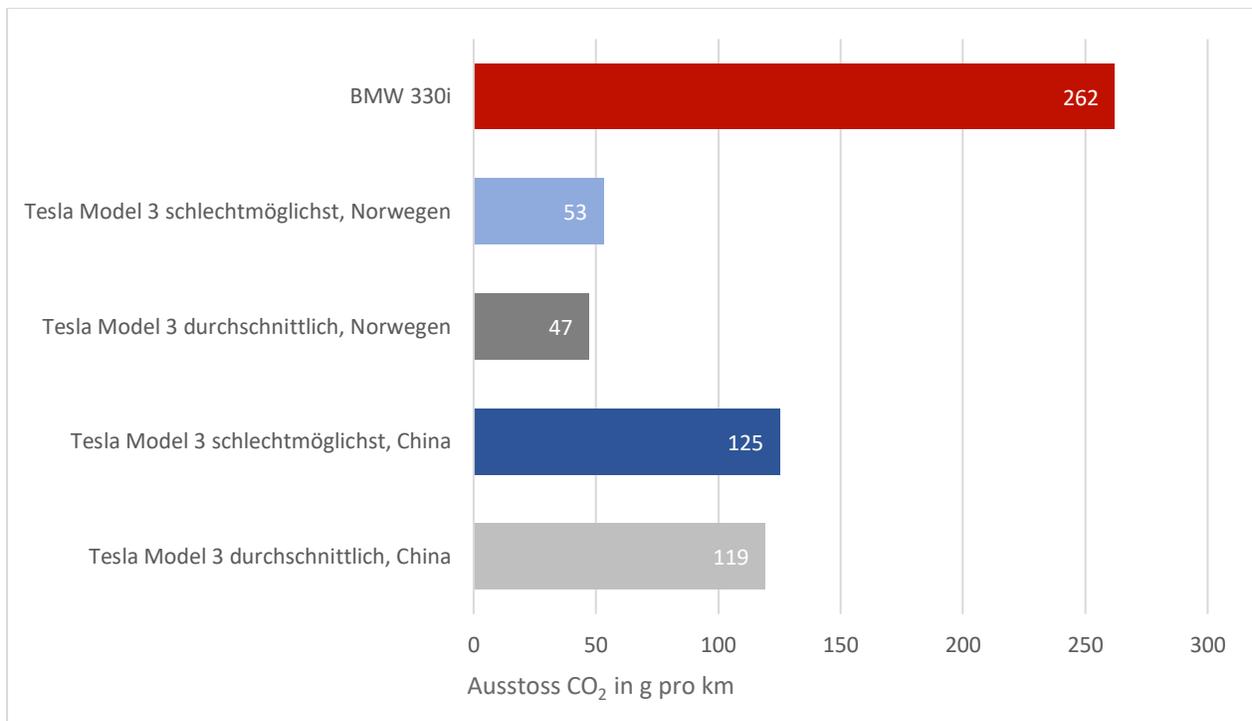
Fahrzeug verhält, wurde Abbildung 18 erstellt. Als Referenzmärkte werden China und Norwegen gewählt, da China den höchsten und Norwegen den niedrigsten CO₂-Ausstoss pro produzierter kWh Strom aufweisen. Selbst im schlechtesten Szenario, welches das Land mit der CO₂-intensivsten Stromproduktion repräsentiert, produziert ein Elektrofahrzeug über den gesamten Life Cycle betrachtet weniger CO₂. In diesem Fall emittiert das Elektroauto nach ca. 50'000 km weniger CO₂ als ein vergleichbares Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Abbildung 18 zeigt deutlich, dass viel entscheidender ist, in welchem Markt ein Elektroauto bewegt wird, als wie der Akku produziert wurde. Die beiden blauen Linien repräsentieren ein Elektroauto aus der schlechtmöglichsten Produktion. Wird dieses allerdings in Norwegen gefahren, ist der Ausstoss über den ganzen Life Cycle, trotz der CO₂-intensiven Produktion, sehr gering.

Abbildung 18: Life Cycle Analyse mittlerer und schlechtester Fall fürs E-Auto



Für den Life Cycle Ausstoss pro Kilometer, wird der Ausstoss der Produktion, der Nutzung und des Recyclings addiert und durch die totale Laufleistung geteilt. Dies wird mit den gleichen Daten wie in Abbildung 18 errechnet und ist in Abbildung 19 dargestellt. So ist der durchschnittliche CO₂-Ausstoss pro Kilometer ersichtlich, wobei alle vorliegenden und nachkommenden Prozesse, sprich Produktion und Recycling, berücksichtigt werden. Auffällig ist, dass der BMW pro Kilometer deutlich mehr CO₂ emittiert als jede Variante des Tesla. Ebenfalls wird deutlich, dass ein Elektroauto über den ganzen Life Cycle wenig CO₂ emittiert, wenn die Stromproduktion, die in der Nutzungsphase das Fahrzeug mit Strom versorgt, wie in Norwegen sehr CO₂-neutral ist.

Abbildung 19: CO₂-Ausstoss pro Kilometer



6.3 Modellbildung

Auf Basis aller gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Modell entwickelt, in dem jedes Elektroauto mit jedem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor verglichen werden kann. Dies kann als Grundlage für Konsumenten dienen, wenn der CO₂-Ausstoss ein wichtiger Faktor bei der Kaufentscheidung für ein Fahrzeug ist. Das Modell benötigt lediglich sechs Zahlen, welche vom Benutzer eingegeben werden. Anhand dieser Zahlen kann das Modell mittels hinterlegter Formeln, die auf Erkenntnissen dieser Arbeit beruhen, errechnen, wie viel CO₂ beide Fahrzeugkonzepte über den ganzen Lebenszyklus emittieren. Um dies zu veranschaulichen und für Konsumenten verständlich zu machen, generiert das Modell automatisch zwei Graphen, welche den CO₂-Ausstoss über den Kilometerverlauf aufzeigen. Von den sechs Zahlen, welche der Benutzer eingegeben kann, beziehen sich vier auf das Elektroauto und zwei auf das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Beim Elektroauto handelt es sich um folgende Angaben: das Gewicht ohne Akkupaket, die Akkukapazität in kWh, den CO₂-Ausstoss pro kWh produziertem Strom vom jeweiligen Land und die WLTP Reichweite. Beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor werden lediglich das Fahrzeuggewicht und der direkte CO₂-Ausstoss beim Fahren in g pro km benötigt.

Das Modell liefert keine 100% exakten Ergebnisse. Allerdings sind die Werte, welche durch das Modell generiert werden mit dieser Arbeit begründet und auf wissenschaftliche Quellen gestützt. Bei der Elektrofahrzeugproduktion werden in dieser Arbeit drei Szenarien unterschieden, wie in Abbildung 9 dargestellt. Das Modell rechnet für die Produktion mit den Zahlen des durchschnittlichen Szenarios für die Elektroautoproduktion. Dies wurde so gewählt, damit das Modell breiter einsetzbar ist. Für die Berechnung des CO₂-Ausstosses bei der Lithium-Ionen-Akku-Produktion ist es essentiell, wo diese hergestellt werden und von welchen Energieträgern der Strom stammt. Das durchschnittliche Szenario rechnet mit einem Strommix aus erneuerbaren, atomaren und fossilen Energieträgern (Emilsson & Dahllöf, 2019). Dies ermöglicht es, potenzielle Abweichungen zu verringern, was bei der Berechnung mit dem besten oder schlechtesten Szenario nicht der Fall wäre.

Abbildung 20 zeigt die Eingabemaske für das entwickelte Modell. Die rot umrandeten Felder können mit den Zahlen von den beiden zu vergleichenden Fahrzeugen ausgefüllt werden. Fast alle benötigten Daten sind auf Webseiten von Fahrzeugherstellern aufgeschaltet, ausgenommen die Zahl der Stromproduktion. Von vielen Länder sind dazu von offiziellen Behörden Zahlen online

zu finden. Sollte der Nutzer dabei Probleme haben, kann er sich an der Hilfestellung links in Abbildung 20 orientieren.

Abbildung 20: Modell für den Fahrzeugvergleich

Elektroauto			Fahrzeug mit Verbrennungsmotor			
	CO2 Ausstoss (kg) pro kg Fahrzeugproduktion	Fahrzeuggewicht ohne Akku (kg)	CO2 Ausstoss (kg) Produktion ohne Akku	CO2 Ausstoss (kg) pro kg Fahrzeug	Fahrzeuggewicht (kg)	CO2 Ausstoss (kg) Produktion
Produktion:	4.26	1369	5838.38	4.26	1640	6994.12
	CO2 Ausstoss (kg) pro kWh Akku	Akkupazität in kWh				
Akkupaket Produktion:	83.5	75	6262.5			
		Total:	12100.88			
	CO2 Ausstoss (g) pro kWh produziertem Strom	CO2 Ausstoss (g) für eine Vollladung		CO2 Ausstoss (g) pro km		Ausstoss CO2 (g) pro km
Betrieb:	449	33675		1.34	178	237.72
<u>Stromproduktion Hilfestellung:</u>						
Fast ausschliesslich erneuerbare Energiequellen: 10-50 g CO2 pro kWh (Schweiz, Norwegen)			CO2 Ausstoss (g) pro km			
Atom, Kohle und Erneuerbarer Energiemix: 300-500 g CO2 pro kWh (USA, Deutschland)			560	60.13		
Grösstenteils fossile Energieträger Kohle & Öl: 500-600 g CO2 pro kWh (China)						
	CO2 Ausstoss (kg) pro kg recyceltem Fahrzeug ohne Akku	CO2 Ausstoss (kg) Recycling ohne Akku		CO2 Ausstoss (kg) pro kg recyceltem Fahrzeug ohne Akku		CO2 Ausstoss (kg) Recycling
Recycling:	0.05	68.45		0.05		82
	CO2 Ausstoss (kg) pro recyceltem kg Akkupaket	CO2 Ausstoss (kg) Recycling Akkupaket				
Akkupaket Recycling:	2.494	1187.77				
	Total CO2 Ausstoss (kg) Recycling	1256.22				

6.3.1 Darstellung der Resultate

Das Resultat der eingegebenen Daten wird in Form eines Graphen dargestellt. Dieser zeigt über den gesamten Fahrzeuglebenszyklus, welcher Produktion, Nutzung und Recycling beinhaltet, wie viel CO₂, die jeweiligen Fahrzeuge emittieren. Diese Art der Ergebnisausgabe wurde gewählt, da sie einfach zu verstehen ist und graphisch direkt ersichtlich ist, ab welcher Kilometerzahl das Elektroauto weniger CO₂ emittiert als ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Abbildung 21 zeigt das Resultat des Modells, welches exemplarisch mit den Daten des Tesla Model 3 und dem BMW 330i ausgefüllt und mit dem US-amerikanischen Strommix gerechnet wurde. Werden die Ergebnisse aus dem Modell mit denen aus Abbildung 16 und Abbildung 18 verglichen, wird ersichtlich, dass die Ergebnisse korrelieren. Dabei wurden Abbildung 16 und Abbildung 18 nicht

mittels des Modells generiert, sondern über manuelle Dateneingabe, basierend auf der Life Cycle Analyse, erstellt. So wird das Modell und dessen Funktion überprüft.

Abbildung 21: Ausgabemaske Modell



7. Fazit

In diesem Abschnitt werden die Kernerkenntnisse nochmals in prägnanter Form erläutert und zusammengefasst. Zudem wird die zentrale Forschungsfrage, «Emittieren Elektrofahrzeuge über den gesamten Lebenszyklus weniger CO₂ als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren?», direkt beantwortet.

Am Ende des Abschnittes Fazit finden sich Empfehlungen, in welcher Thematik mehr Forschungsbedarf besteht, welcher sich aus der Bearbeitung und Beantwortung der Forschungsfrage ergeben haben. Zudem wird die Relevanz der Ergebnisse diskutiert.

7.1 Beantwortung der Forschungsfrage

Zusammenfassend emittiert das Tesla Model 3 über den gesamten Life Cycle in jedem analysierten Markt (USA, China, Deutschland, Norwegen, Schweiz) deutlich weniger CO₂ als ein BMW 330i. Aufgeschlüsselt auf die einzelnen Abschnitte des Life Cycle (Herstellung, Nutzung, Recycling) trennen sich die Fahrzeuge vor allem in der Nutzungsphase.

Produktion: Durch den Lithium-Ionen-Akku, welcher in jedem modernen Elektrofahrzeug verbaut ist, emittiert die Produktion eines Elektroautos mehr CO₂ als bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Im direkten Vergleich der beiden Fahrzeuge Tesla Model 3 und BMW 330i ist die Produktion des Tesla 50 - 95% CO₂-intensiver als beim BMW. Die Schwankung bei der Elektroautoproduktion ist durch verschiedene Strommixe zu erklären. Wenn die Stromversorgung für die Produktion des Akkupakets fast ausschliesslich aus erneuerbaren Energien stammt, emittiert das Tesla Model 3 ca. 50% mehr CO₂ bei der Produktion als der BMW. Da Tesla die Akkus selber produziert und der Strom dafür fast ausschliesslich aus erneuerbaren Energien stammt, ist dies das realistische Szenario für den Tesla.

Nutzung: Erst in der Nutzungsphase zeigt sich der essentielle Unterschied bezüglich des CO₂-Ausstosses. Ein Elektrofahrzeug stösst direkt kein CO₂ aus, allerdings wird zum Fahren Strom benötigt. Aus diesem Grund ist der indirekte CO₂-Ausstoss, welcher von der Stromproduktion verursacht wird, entscheidend für die Bilanz eines Elektroautos. Wird dieses z.B. in der Schweiz oder in Norwegen bewegt, wo der Strom fast ausschliesslich aus erneuerbaren Energiequellen

stammt, weist der Tesla bereits nach etwa 14'500 gefahrenen Kilometer eine bessere CO₂-Bilanz als der BMW auf. Bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor muss nicht nur der direkte Ausstoss berücksichtigt werden, sondern auch noch alle CO₂-Emissionen, welche entstehen, bis das Rohöl vom Abbauort verarbeitet als Benzin an der Tankstelle ankommt. Vom gesamten CO₂-Ausstoss eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor in der Nutzungsphase, entstehen etwa ¼ der Emissionen noch bevor das Fahrzeug auch nur einen Meter gefahren ist. Wird das Elektroauto in Märkten bewegt in denen die Stromproduktion CO₂-intensiver ist, wie z.B. in den USA, China oder Deutschland, ist dieses über den gesamten Lebenszyklus immer noch deutlich CO₂-ärmer. Allerdings ist der Mehrausstoss der Produktion in diesen Ländern nach etwa 20'000 gefahrenen Kilometern amortisiert. Wird eine Lebensdauer von 300'000 km angenommen, ist der Tesla in den Märkten USA, China und Deutschland etwa 2.5-mal CO₂-ärmer als der BMW 330i. Bei Betrachtung der Märkte Schweiz und Norwegen, emittiert das Tesla Model 3 über diese Lebensdauer sogar ca. 6-mal weniger CO₂ als ein BMW 330i.

Recycling: Der CO₂-Ausstoss vom Recycling eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor fällt nicht ins Gewicht, wenn der gesamte Ausstoss betrachtet wird. In dieser Phase des Life Cycle ist der Lithium-Ionen-Akku das Bauteil, welches am meisten CO₂ emittiert. Da allerdings noch sehr wenige Akkus von aktuellen Elektroautos das Ende des Life Cycles erreicht haben, sind die Daten über Emissionen beim Fahrzeug-Akku-Recycling rar.

7.2 Relevanz der Ergebnisse

Im April 2020 veröffentlichte das Institut Transport & Environment eine Studie über den CO₂-Ausstoss von Elektrofahrzeugen in Europa im Vergleich zu Benzin und Diesel getriebenen Autos. Die Bachelorarbeit entstand unabhängig von der Studie des Instituts für Transport & Environment. Kurz vor der Fertigstellung der Bachelorarbeit wurde die Studie veröffentlicht (April 2020). Die Resultate der Studie decken sich über alle analysierten Bereiche (Produktion, Nutzung, Recycling) mit den Resultaten aus dieser Arbeit. Dies bestätigt eine gewisse Konsistenz der Resultate, welche im vorliegenden Dokument erarbeitet wurden. Die Studie beschränkt sich allerdings auf den europäischen Markt (Transport & Environment, 2020). Diese Arbeit hingegen analysiert fünf Hauptabsatzmärkte von Elektroautos.

7.3 Weiterer Forschungsbedarf

Über CO₂-Emissionen vom Lithium-Ionen-Akku-Recycling ist noch wenig bekannt. Die Technologie von Elektroautos ist noch neu, weshalb bis zum jetzigen Zeitpunkt kaum Fahrzeuge im Recyclingprozess angekommen sind. In Zukunft werden jedoch immer mehr Elektroautos das Ende des Life Cycle erreichen und somit in die Wiederverwertung gelangen. Dies birgt nicht nur Potenzial für weitere Forschungen, sondern könnte auch die Produktion von Akkus für Elektroautos weniger CO₂ intensiv machen. Werden zukünftig mehr Akkupakete recycelt, können zurückgewonnene Materialien wiederverwendet werden. Dadurch müssen diese Materialien nicht mehr in enormen Mengen abgebaut werden. In diesem Themenbereich besteht noch ein Mangel an Literatur und birgt somit viel Potential für Forschungs- und Analysearbeit.

7.4 Handlungsempfehlung

Ist die Umweltfreundlichkeit eines Fahrzeuges wichtig für den Konsumenten, lohnt es sich ein Elektrofahrzeug zu fahren. Wenn es dem Konsumenten ein Anliegen ist, den CO₂-Ausstoß noch weiter zu reduzieren, könnte zusätzlich der Strombedarf für das Fahrzeug individuell durch erneuerbare Energien gedeckt werden, was z.B. mittels Solarpanels auf dem Hausdach erreicht werden kann. Die vorliegende Arbeit ist auf diesen Punkt absichtlich nicht genauer eingegangen, da sich die Fragestellung auf den allgemeinen Strommix der Länder bezieht und nicht individuelle Möglichkeiten der Stromproduktion analysiert wurden. Günstige Elektrofahrzeuge sind momentan noch nicht auf dem Markt erhältlich. Auch Gebrauchtwagen halten den Wert relativ gut und sind so nicht für jeden erschwinglich. Sind jedoch die nötigen finanziellen Mittel für die Anschaffung eines Elektroautos vorhanden, kann der Kauf empfohlen werden, da so in der individuellen Mobilität weniger CO₂ emittiert wird. Dies gilt besonders in Märkten wie Norwegen oder der Schweiz, wo durch die CO₂-arme Stromproduktion das Einsparpotential im Vergleich zu einem herkömmlichen Fahrzeug enorm ist.

7.5 Schlussbetrachtung

Wenn zukünftig mehr Materialien von recycelten Lithium-Ionen-Batterien verwendet werden können, wird die Produktion von Akkupaketen weniger CO₂-intensiv sein als zurzeit. Dies bedeutet, dass der gesamte Produktionsprozess von Elektroautos weniger CO₂ verursachen würde. Viele Forscher sind sich einig darüber, dass Elektrofahrzeuge in Zukunft eine wichtige Rolle im

Individualverkehr übernehmen werden. Die Möglichkeiten den CO₂-Ausstoss bei Elektrofahrzeugen weiter zu senken sind gegeben. Dies geht über eine weniger energieintensive Produktion, vermehrtes verwenden von recycelten Materialien aus alten Batterien bis hin zur Senkung von Emissionen in der Stromproduktion. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor besitzen hingegen weniger Einsparpotential bezüglich des CO₂-Ausstosses. Das Verbrennen von Benzin emittiert CO₂, was die Einsparung bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor limitiert. Elektrofahrzeuge emittieren schon heute deutlich weniger CO₂ als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Zukünftig wird dieser Trend weiter steigen, da in der Weiterentwicklung von Elektrofahrzeugen ein hohes Potential liegt.

8. Literaturverzeichnis

Affeldt, J., & Hüttmann, M. (2018). *WELL-TO-TANK: Vom Bohrloch zum Tank*.

Ambe, I., & Badenhorst-Weiss, J. (2011). An automotive supply chain model for a demand-driven environment. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 5. Abgerufen von <https://doi.org/10.4102/jtscm.v5i1.18>.

Aradex. (2019). *Batterien für Elektrofahrzeuge*. Abgerufen von <https://www.aradex.de/de/produkte/batterien-energiequellen/batterien/>.

Argonne National Laboratory. (2019). *GREET Vehicle Cycle Model*. Abgerufen von <https://greet.es.anl.gov/index.php?content=download2x>.

Autokiste. (2020). *Mittelklasse (Fahrzeugklassen/Bestseller) [Autokiste]*. Abgerufen von <http://www.autokiste.de/service/segmente/mittelklasse.htm>.

Bamert, O. (2020). *Haltbarkeit von Autos—Die Langläufer*. AutoScout24. Abgerufen von <https://www.autoscout24.ch/de/c/d/information/haltbarkeit-von-autos-die-langlaeufer?a=1254>.

BMW Schweiz. (2020). *BMW Schweiz*. Abgerufen von <https://www.bmw.ch/de/home.html>.

Brech, S. M. (2018, Oktober 8). IPCC-Sonderbericht zum Klimawandel: CO₂-Ausstoß muss bis 2050 bei null liegen. *DIE WELT*. Abgerufen von <https://www.welt.de/wissenschaft/article181793882/IPCC-Sonderbericht-zum-Klimawandel-CO2-Ausstoss-muss-bis-2050-bei-null-liegen.html>.

Bundesamt für Energie. (2020). *74 Prozent des Stroms aus Schweizer Steckdosen stammten 2018 aus erneuerbaren Energien*. Abgerufen von <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-78113.html>.

Bundesamt für Energie BFE. (2018). *Energietikette für Personenwagen: Umweltkennwerte 2018 der Strom- und Treibstoffbereitstellung.*

Bundesamt für Energie, & Bundesamt für Strassen. (2018). *Einführung WLTP i der Schweiz.*

Bundesamt für Umwelt BAFU. (2018). *Klimawandel: Fragen und Antworten.* Abgerufen von <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimawandel--fragen-und-antworten.html>.

Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft. (2019). *Klimaschutzreport 2019.*

Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft. Abgerufen von <https://www.bdl.aero/de/publikation/klimaschutzreport/>.

Center of Automotive Management. (2020). *Electromobility Report.* Abgerufen von https://autoinstitut.de/index_htm_files/E-Absatz_18-19.png.

Clean Technica. (2019). *300,000–500,000 Miles In A Tesla—How Does A Tesla Hold Up?* CleanTechnica. Abgerufen von <https://cleantechnica.com/2019/11/23/500000-miles-in-a-tesla-whats-the-result/>.

Climate Transparency. (2019). *The G20 transition towards a net-zero emissions economy, China.* Abgerufen von https://www.climate-transparency.org/wpcontent/uploads/2019/11/B2G_2019_China.pdf.

Cox, B., & Bauer, C. (2018). *Die Umweltauswirkungen von Personenwagen: Heute und morgen.* Labor für Energiesystemanalysen, Paul Scherrer Institut.

Dai, Q., Kelly, J., Dunn, J., & Benavides. (2018a). *Update of bill-of-materials and cathode materials production for lithium-ion batteries in the GREET® model* [Argonne National Laboratory]. Abgerufen von https://greet.es.anl.gov/publication-update_bom_cm.

- Dai, Q., Kelly, J., & Elgowainy, A. (2018b). *Cobalt Life Cycle Analysis Update for the GREET® Model* [Argonne National Laboratory]. Abgerufen von https://greet.es.anl.gov/publication-update_cobalt.
- Dai, Qiang, Kelly, J. C., Gaines, L., & Wang, M. (2019). Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. *Batteries*, 5(2), 48. Abgerufen von <https://doi.org/10.3390/batteries5020048>.
- Di Lullo, G., Zhang, H., & Kumar, A. (2017). Uncertainty in well-to-tank with combustion greenhouse gas emissions of transportation fuels derived from North American crudes. *Energy*, 128, 475–486. Abgerufen von <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.040>.
- Dunn, J., Gaines, L., Kelly, J., James, C., & Gallagher, K. (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *Energy & Environmental Science*, 8(1), 158–168. Abgerufen von <https://doi.org/10.1039/C4EE03029J>.
- Edwards, R., Bezait, J.-C., & Larivé, J.-F. (2011). *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context* [European Commission Joint Research Centre, Institute for Energy]. Abgerufen von <https://www.sae.org/content/2004-01-1924/>.
- Ellingsen, L. A.-W., Hung, C. R., & Strømman, A. H. (2017). Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions. 82-90. Abgerufen von <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.028>.
- Emilsson, E., & Dahllöf, L. (2019). *Lithium-Ion Vehicle Battery Production, Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling* [IVL Swedish Environmental Research Institute]. Abgerufen von <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf>.

- Energy Brainpool. (2017, Februar 9). Stromerzeugung in China 2016: Großes Wachstum erneuerbarer Energien inmitten thermischer Erzeugung. *Energy BrainBlog*. Abgerufen von <https://blog.energybrainpool.com/stromerzeugung-in-china-2016-grosses-wachstum-erneuerbarer-energien-inmitten-thermischer-erzeugung/>.
- Esser, C. (2016, Oktober 20). *Die Kleine Anfrage: Warum wiegt CO2 aus dem Auspuff mehr als der Sprit im Tank?* Abgerufen von <https://www1.wdr.de/wissen/technik/kohlenstoffdioxid-sprit-100.html>.
- Europäisches Parlament. (2019, März 22). *CO2-Emissionen von Autos: Zahlen und Fakten (Infografik) | Aktuelles | Europäisches Parlament*. Abgerufen von <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik>.
- Focus online. (2018). *Mindestens 400.000 Kilometer: Diese Autos halten am längsten*. FOCUS Online. Abgerufen von https://www.focus.de/auto/gebrauchtwagen/vw-mercedes-toyota-volvo-mindestens-400-000-kilometer-diese-autos-halten-am-laengsten_id_9851652.html.
- Frischknecht, R., Messmer, A., & Stolz, P. (2018). *Aktualisierung Umweltaspekte von Elektroautos*. Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- Fysikopoulos, A., Anagnostakis, D., Salonitis, K., & Chryssolouris, G. (2012). An Empirical Study of the Energy Consumption in Automotive Assembly. *Procedia CIRP*, 3, 477–482. Abgerufen von <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.082>.
- Gelowicz, S. (2019). *Was sind Automobilzulieferer? Grundlagen, Ranking und Beispiele*. Abgerufen von <https://www.automobil-industrie.vogel.de/was-sind-automobilzulieferer-grundlagen-ranking-und-beispiele-a-724889/>.
- Gloor, R. (2011, Mai 5). *Verbrennungsmotoren*. energie.ch. Abgerufen von <https://energie.ch/verbrennungsmotoren/>.

- Gordillo, V., Rankovic, N., & Abdul-Manan, A. (2018). Customizing CO2 allocation using a new non-iterative method to reflect operational constraints in complex EU refineries. *ResearchGate*. Abgerufen von https://www.researchgate.net/publication/318916211_Customizing_CO2_allocation_using_a_new_non-iterative_method_to_reflect_operational_constraints_in_complex_EU_refineries.
- Hoyer, C. (2015). Grundlagen des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen. In C. Hoyer, *Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland* (S. 9–72). Springer Fachmedien Wiesbaden. Abgerufen von https://doi.org/10.1007/978-3-658-10274-6_2.
- International Energy Agency. (2019). *Data & Statistics Norway*. IEA. Abgerufen von <https://www.iea.org/data-and-statistics>.
- Iqtidar, A. (2019). *Battery Expert: Tesla Model 3 has „most advanced large scale lithium battery ever produced“ [Video]*. Abgerufen von <https://evannex.com/blogs/news/tesla-s-battery-pack-is-both-mysterious-and-alluring-work-in-progress>.
- Kanari, N., Pineau, J.-L., & Shallari, S. (2003). End-of-life vehicle recycling in the european union. *JOM*, 55(8), 15–19. Abgerufen von <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0098-7>.
- Kane, M. (2020). *Global EV Sales For 2019 Now In: Tesla Model 3 Totally Dominated*. InsideEVs. Abgerufen von <https://insideevs.com/news/396177/global-ev-sales-december-2019/>.
- Manager Magazin. (2019). *Tesla Rekordfahrt im Model S: V. Gemmingen fährt 1 Million km im Elektroauto*. manager magazin. Abgerufen von <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/elektroauto-rekordfahrt-wie-v-gemmingen-1-mio-km-im-tesla-model-s-fuhr-a-1298664.html>.

- Mas Alique, P., & Munoz Jimenez, D. (2013). *Calculation of the carbon footprint and analysis of vehicle recycling from an environmental point of view*. Universidad Católica de Ávila.
- Masnadi, M. S., El-Houjeiri, H., Schunack, D., Li, Y., Englander, J., Badahdah, A., Monfort, J.-C., Anderson, J., Wallington, T., Bergerson, J., Gordon, D., Koomey, J., Przesmitzki, S., Azevedo, I., Bi, X., Duffy, J., Heath, G., Keoleian, G., McGlade, C., & Brandt, A. (2018a). Global carbon intensity of crude oil production. *Science*, 361. Abgerufen von <https://doi.org/10.1126/science.aar6859>.
- Masnadi, M. S., El-Houjeiri, H., Schunack, D., Li, Y., Englander, J., Badahdah, A., Monfort, J.-C., Anderson, J., Wallington, T., Bergerson, J., Gordon, D., Koomey, J., Przesmitzki, S., Azevedo, I., Bi, X., Duffy, J., Heath, G., Keoleian, G., McGlade, C., & Brandt, A. (2018b). *Supplementary Materials for Global carbon intensity of crude oil production*.
- Munters. (2020). *Batterie-Trockenräume*. Abgerufen von <https://www.munters.com/de/Branchen/electronics/lithium-battery-rooms/>.
- Norwegian Water Resources and Energy Directorate. (2018). *Electricity disclosure 2018*. Abgerufen von <https://www.nve.no/norwegian-energy-regulatory-authority/retail-market/electricity-disclosure-2018/>.
- Pucher, E. (2020). *Auto, Energie und Umwelt* (1. Aufl.). Springer. Abgerufen von <https://www.springerprofessional.de/auto-energie-und-umwelt/17521662?fulltextView=true>.
- Romare, M., & Dahllöf, L. (2017). *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*.
- Sandbag. (2019). EU Power Sector 2019. *Ember*. Abgerufen von <https://ember-climate.org/project/power-2019/>.

Schweizerische Energie Stiftung. (2018). *Fachtagung 2018: Mobilität der Zukunft*. Abgerufen von <https://www.energiestiftung.ch/veranstaltung/fachtagung-2018-mobilitaet-der-zukunft.html>.

Some. (2018). *Tier 2 international company in the automotive sector*. Abgerufen von <https://www.some.es/en/SOME-TIER-2-international-company-in-the-automotive-sector>.

Statista. (2019). *Antriebstechnologien für Pkw*. Statista. Abgerufen von <https://de.statista.com/statistik/studie/id/52706/dokument/antriebstechnologien-fuer-pkw/>.

Statistisches Bundesamt. (2019). *Bruttostromerzeugung in Deutschland*. Statistisches Bundesamt. Abgerufen von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/Tabellen/bruttostromerzeugung.html>.

Staudinger, J., & Keoleian, G. (2001). *Management of End-of Life Vehicles in the US*. Abgerufen von http://css.umich.edu/sites/default/files/css_doc/CSS01-01.pdf.

Sullivan, J. L., Burnham, A., & Wang, M. (2010). *Energy-Consumption and Carbon-Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing*. Argonne National Laboratory.

Tesla. (2020). *Model 3 | Tesla*. Model 3. Abgerufen von <https://www.tesla.com/model3>.

Tesla Schweiz. (2020). *Tesla Gigafactory*. Abgerufen von https://www.tesla.com/de_CH/gigafactory.

Transport & Environment. (2020). *How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions*. Abgerufen von <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/downloads/T%26E%E2%80%99s%20EV%20life%20cycle%20analysis%20LCA.pdf>.

Umwelt Bundesamt. (2020). *Spezifische Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix* [Text].

Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. Abgerufen von

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von->

[luftschadstoffen/spezifische-emissionsfaktoren-fuer-den-deutschen](https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/spezifische-emissionsfaktoren-fuer-den-deutschen).

U.S. Energy Information Administration (EIA). (2020a). *Energy conversion calculators*.

Abgerufen von <https://www.eia.gov/energyexplained/units-and-calculators/energy-conversion-calculators.php>.

U.S. Energy Information Administration (EIA). (2020b). *How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U.S. electricity generation*. Abgerufen von

<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>.

U.S. Energy Information Administration (EIA). (2020c). *What is U.S. electricity generation by energy source?* Abgerufen von <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3>.

Vaillant, M. (2016). *Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad* (Bd. 45). KIT Scientific Publishing.

Volkswagen. (2019). *Ökobilanz im Volkswagen Konzern*. Abgerufen von

<https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/04/from-the-well-to-the-wheel.html>.

Volkswagen Aktiengesellschaft. (2019). *Klimabilanzen von E-Fahrzeugen & Life Cycle Engineering*.

World Academy of Science. (2016). *Evaluation of a Remanufacturing for Lithium Ion Batteries from Electric Cars*.

Yuan, C., Deng, Y., Li, T., & Yang, F. (2017). Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66.

Abgerufen von <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.109>.

Zukunftsinstitut. (2017). *Die Evolution der Mobilität*. Abgerufen von

[https://www.zukunftsinstitut.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Auftragsstudien/AD
AC_Mobilitaet2040_Zukunftsinstitut.pdf](https://www.zukunftsinstitut.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Auftragsstudien/AD_AC_Mobilitaet2040_Zukunftsinstitut.pdf).

9. Anhang

Zusammensetzung Lithium-Ionen-Batteriepack der Automobilindustrie

Die untenstehende Tabelle zeigt, welcher Bestandteil in Lithium-Ionen-Batterien am Energieintensivsten ist. Dabei wird deutlich, dass das Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC) mit 45% der Gesamtenergienutzung der Komponenten deutlich den höchsten Energieaufwand in Anspruch nimmt. NMC ist das Speichermaterial in den Batteriezellen, das den Strom speichert (Aradex, 2019).

Tabelle 13: Komponenten Lithium-Ionen-Batterien

Komponenten	Material	Prozentsatz Energiekonsum (%)
Zell	NMC111 Pulver*	45.00
	Graphit	9.74
	Aluminium	5.57
	Kupfer	3.92
	Lithiumhexafluorophosphat	2.23
	Kohlensäuredimethylester	1.30
	Industrieruss	1.18
	Polypropylen	0.67
	Polyvinylidenfluorid	0.60
	Ethylencarbonat	0.35
	Polyethylen	0.16
	Polyethylenterephthalat	0.12
Modul	Aluminium	4.10
	Elektronische Komponenten	2.09
	Kupfer	0.09
	Polyethylen	0.07
	Isolationsmaterial	0.01
Batterieback	Aluminium	12.70
	Elektronische Komponenten	9.16
	Kühlmittel	0.66
	Stahl	0.15
	Isolationsmaterial	0.09
	Kupfer	0.02
	Total	99.98

*Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid im Verhältnis 1:1:1

Quelle: Dai et al., 2019

Aufstellung Strommix USA

In der Untenstehenden Grafik ist der exakte Strommix der USA im Jahr 2019 aufgelistet.

Abbildung 22: Strommix USA

U.S. utility-scale electricity generation by source, amount, and share of total in 2019¹

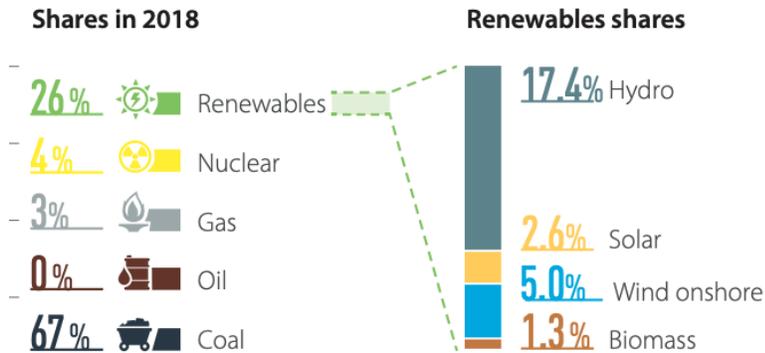
Energy source	Billion kWh	Share of total
Total - all sources	4,118	
Fossil fuels (total)	2,580	62.7%
Natural Gas	1,582	38.4%
Coal	966	23.5%
Petroleum (total)	19	0.5%
Petroleum liquids	12	0.3%
Petroleum coke	7	0.2%
Other gases	14	0.3%
Nuclear	809	19.7%
Renewables (total)	720	17.5%
Hydropower	274	6.6%
Wind	300	7.3%
Biomass (total)	58	1.4%
Wood	40	1.0%
Landfill gas	10	0.2%
Municipal solid waste (biogenic)	6	0.1%
Other biomass waste	2	0.1%
Solar	72	1.8%
Photovoltaic	69	1.7%
Solar thermal	3	0.1%
Geothermal	16	0.4%
Pumped storage hydropower³	-5	-0.1%
Other sources³	13	0.3%

Quelle: U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020c

Aufstellung Strommix China

In der Untenstehenden Grafik ist der exakte Strommix von China im Jahr 2018 dargestellt.

Abbildung 23: Strommix China



Quelle: Climate Transparency, 2019

Aufstellung Strommix Deutschland

In der Untenstehenden Grafik ist der exakte Strommix von Deutschland in den Jahren 2016, 2017 und 2018 aufgelistet.

Abbildung 24: Strommix Deutschland

Energieträger	2016		2017		2018 ¹	
	Mrd.kWh	%	Mrd.kWh	%	Mrd.kWh	%
Bruttostromerzeugung insgesamt	650,7	100	653,6	100	646,8	100
Braunkohle	149,5	23,0	148,4	22,7	145,5	22,5
Kernenergie	84,6	13,0	76,3	11,7	76,0	11,8
Steinkohle	112,2	17,2	92,9	14,2	83,2	12,9
Erdgas	81,3	12,5	86,7	13,3	83,4	12,9
Mineralölprodukte	5,8	0,9	5,6	0,9	5,2	0,8
Erneuerbare Energieträger	189,9	29,2	216,2	33,1	226,4	35,0
Windkraft	80,2	12,3	105,6	16,1	111,5	17,3
Wasserkraft ²	20,5	3,2	20,2	3,1	16,6	2,6
Biomasse	45,0	6,9	45,0	6,9	45,7	7,1
Photovoltaik	38,1	5,9	39,4	6,0	46,2	7,1
Hausmüll ³	5,9	0,9	6,0	0,9	6,2	1,0
Übrige Energieträger	27,3	4,2	27,5	4,1	27,0	4,1

Quelle: Statistisches Bundesamt, 2019

Aufstellung Strommix Norwegen

In der Untenstehenden Grafik ist der exakte Strommix von Norwegen aus dem Jahr 2018 aufgelistet.

Abbildung 25: Strommix Norwegen

Energy Category	Country or region	Year
Electricity	Norway	2018
		Electricity
		GWh
Coal		179
Oil		28
Natural gas		2 603
Biofuels		27
Waste		359
Nuclear		
Hydro		140 105
Geothermal		
Solar PV		
Solar thermal		
Wind		3 876
Tide		
Other sources		276
Municipal Waste		359
Waste (renewable)		163
Total production		147 453

Quelle: International Energy Agency, 2019

Aufstellung Strommix Schweiz

In der Untenstehenden Grafik ist der exakte Strommix der Schweiz aus dem Jahr 2018 aufgelistet.

Abbildung 26: Strommix Schweiz

Erneuerbare Energien		73.80%
	Wasserkraft	65.95%
	Übrige erneuerbare Energie	2.25%
	Sonnenenergie	1.21%
	Windenergie	0.44%
	Biomasse	0.30%
	Geothermie	0.30%
	Geförderter Strom	5.60%
Nicht erneuerbare Energien		19.00%
	Kernenergie	17.29%
	Fossile Energieträger	1.71%
	Erdöl	0.02%
	Erdgas	0.65%
	Kohle	1.04%
	Abfälle	0.95%
	Nicht überprüfbare Energieträger	6.25%
	Total	100.00%

Quelle: Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018

Batteriepaket Recycling

In der Untenstehenden Grafik sind die notwendigen Prozessschritte detailliert aufgelistet. Zusätzlich ist zu sehen, welche Einsparung von CO₂ das beim Materialabbau durch das Recycling gewonnen werden kann.

Abbildung 27: Recycling Batteriepaket

	/kg battery				
	Dismantling	Cell separation	Cathode separation	Hydro-processing	Total
g CO ₂ -eq	234	586	213	1461	2494
Energy					
Main impact from	Transport, Steel and Al recycling	Cu recycling, washing, burning of separator	Electricity	Supporting materials and electricity	
g CO ₂ -eq credit	-1966	-325	-269	-970	-3530
Energy					
Materials recovered	Stainless steel and plastics	Copper and Aluminium	Aluminium	Cobalt, Nickel	
Net CO₂-eq	-1732	261	-55	491	-1035

Quelle: Romare & Dahllöf, 2017