



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Deniz Yavasca

Nachhaltigkeitsbewertung batterieelektrischer Fahrzeuge im Vergleich zu Verbrennungsmotorfahrzeugen

Deniz Yavasca

**Nachhaltigkeitsbewertung
batterieelektrischer Fahrzeuge im
Vergleich zu
Verbrennungsmotorfahrzeugen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Dirk Adamski
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Ole Dörr

Abgabedatum:
02.03.2025

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Deniz Yavasca

Thema der Bachelorthesis

Nachhaltigkeitsbewertung batterieelektrischer Fahrzeuge im Vergleich zu Verbrennungsmotorfahrzeugen

Stichworte

Verbrennungsmotorfahrzeuge, batterieelektrische Fahrzeuge, Energiemix, Lebenszyklusanalyse, CO₂-Bilanz, Energieverbrauch, Nachhaltigkeit, Nachhaltigkeitsbewertung, Recyclingfähigkeit, Rohstoffgewinnung, Antriebstechnologie, Mobilitätsstrategien

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit geht es um die Nachhaltigkeitsbewertung von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) im Vergleich zu Verbrennungsmotorfahrzeugen (ICEV). Die Elektromobilität hat sich mittlerweile zu einer Zukunftstechnologie entwickelt, mit dem Ziel CO₂-Emissionen zu senken und nachhaltigere Mobilitätslösungen zu schaffen. Trotz dessen stehen noch offene Fragen im Raum bezüglich der Umweltbilanz und dem Ressourcenverbrauch der beiden Antriebstechnologien. Die Arbeit untersucht somit beide Antriebstechnologien über den gesamten Lebenszyklus, von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung und Recycling. Im Vordergrund stehen hierbei die CO₂-Emissionen, der Ressourcenverbrauch und die Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit der kritischen Rohstoffe Lithium und Kobalt. Zudem wird der Einfluss des des Energiemixes der Europäischen Union auf die Umweltbilanz von batterieelektrischen Fahrzeugen analysiert.

Diese Arbeit kombiniert eine qualitative und quantitative Gegenüberstellung der beiden Antriebstechnologien. Während qualitative Aspekte wie Umwelt- und Ressourcenauswirkungen beschrieben und eingeordnet werden, erfolgt die quantitative Analyse auf Basis definierter Bewertungskriterien und messbarer CO₂-Emissionen, Energieverbrauch und Recyclingquoten, um einen fundierten Vergleich zu ermöglichen. Die Ergebnisse werden so aufbereitet, dass ein direkter Vergleich zwischen konventionellen und batteriebetriebenen Fahrzeugen möglich ist.

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit ist es, eine fundierte Grundlage für die Beurteilung nachhaltiger Mobilitätsstrategien zu schaffen, die zur Entscheidungsfindung in diesem Bereich beiträgt.

Name of Student

Deniz Yavasca

Title of the paper

Sustainability Assessment of Battery Electric Vehicles Compared to Internal Combustion Engine Vehicles

Keywords

Internal Combustion Engine Vehicles (ICEVs), Battery Electric Vehicles (BEVs), Energy Mix, Life Cycle Assessment (LCA), Carbon Footprint (or CO₂ Balance), Energy Consumption, Sustainability, Recyclability, Raw Material Extraction, Propulsion Technology, Mobility Strategies.

Abstract

This thesis focuses on the sustainability assessment of battery electric vehicles (BEVs) compared to internal combustion engine vehicles (ICEVs). Electromobility has now evolved into a future technology with the aim of reducing CO₂ emissions and creating more sustainable mobility solutions. However, open questions remain regarding the environmental impact and resource consumption of the two propulsion technologies. The thesis therefore examines both propulsion technologies over their entire life cycle, from raw material extraction through production and use to disposal and recycling. The main focus is on CO₂ emissions, resource consumption, and the availability and sustainability of critical raw materials such as lithium and cobalt. In addition, the influence of the European Union's energy mix on the environmental balance of battery-powered vehicles is analyzed. This work combines a qualitative and quantitative comparison of the two anti-pollution technologies. While qualitative aspects such as environmental and resource impacts are described and categorized, the quantitative analysis is based on defined evaluation criteria and measurable CO₂ emissions, energy consumptions and recycling rates in order to enable a well-founded comparison. The results are prepared in such a way that a direct comparison between conventional and battery-powered vehicles is possible. The aim of this bachelor thesis is to create a sound basis for the assessment of sustainable mobility strategies, which contributes to decision-making in this area.

Inhaltsverzeichnis

<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>II</i>
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>IV</i>
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Entwicklung der Elektromobilität und konventioneller Antriebstechnologien	4
2.2 Aufbau und Funktionsweise von batterieelektrischen Fahrzeugen	5
2.3 Aufbau und Funktionsweise von Verbrennungsmotorfahrzeugen	7
2.4 Definition und Relevanz der Nachhaltigkeitsbewertung	9
2.5 Lebenszyklusanalyse (LCA)	11
3 Methodik der Nachhaltigkeitsbewertung	14
3.1 Bewertungskriterien	14
3.1.1 CO ₂ -Emissionen	15
3.1.2 Ressourcenverbrauch	15
3.1.3 Recyclingfähigkeit	16
4 Analyse der Lebenszyklen	17
4.1 Batterieelektrische Fahrzeuge	17
4.1.1 Rohstoffgewinnung und Batteriefertigung	17
4.1.2 Nutzung und Energiemix	24
4.1.3 Recyclingstrategien und Rohstoffkreisläufe	27
4.2 Verbrennungsmotorfahrzeuge	31
4.2.1 Rohstoffgewinnung und Fahrzeugproduktion	31
4.2.2 Nutzung und Emissionen	34
4.2.3 Recyclingstrategien und Rohstoffkreisläufe	39
4.3 Vergleich der Antriebstechnologien (BEV vs. ICEV)	44
4.3.1 Ressourcenverbrauch: Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe	44
4.3.2 Energiebedarf: Einfluss unterschiedlicher Energiemixe und Emissionen	46
4.3.3 Recyclingfähigkeit und Strategien zur Nachhaltigkeit	48
5 Ergebnisdarstellung	50
5.1 Vor- und Nachteile beider Antriebstechnologien bzgl. der Nachhaltigkeit	50
5.2 Bewertung der CO ₂ -Bilanz und der Ressourcennutzung	52
5.3 Herausforderungen und Unsicherheiten	55
6 Fazit und Ausblick	59
6.1 Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse	59
6.2 Handlungsempfehlungen für zukünftige Mobilitätsstrategien	60
7 Literaturverzeichnis	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rekuperation der batterieelektrischen Fahrzeuge [8].....	6
Abbildung 2: Der Aufbau des Verbrennungsmotors [13]	7
Abbildung 3: Viertaktverfahren [15, S.51]	9
Abbildung 4: Elemente der Lebenszyklusanalyse [18, S. 346].....	12
Abbildung 5: Concept Map zur Darstellung der methodischen Vorgehensweise ..	15
Abbildung 6: Anteile ausgewählter Länder an der weltweiten Produktion von Kobalt im Jahr 2023 [36].....	19
Abbildung 7: Nachfrage an Nickel für E-Mobilität (1) und für Anwendungen im Bereich Erneuerbare Energien (2) [23, S.31]	20
Abbildung 8: Nachfrage an Grafit für E-Mobilität (1) und für Anwendungen im Bereich Erneuerbare Energien (2) [23, S.30]	21
Abbildung 9: Anteile einzelner Bauteile an den verursachten Treibhausgasemissionen bei der Produktion eines BEV-Antriebsstrangs [31]	22
Abbildung 10: Projected carbon footprint of Northvolt battery cells in 2023, with a target for 2030 [34]	23
Abbildung 11: Entwicklung des Emissionsfaktors der Stromerzeugung in Deutschland und Frankreich im Zeitraum 2000 bis 2023 [25]	25
Abbildung 12: Electricity generation emission intensity in selected countries worldwide in 2023 [28].....	26
Abbildung 13: Distribution of Palladium demand worldwide in 2022 [50]	33
Abbildung 14: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland von 2013 bis 2023 (Verbrauch auf 100 Kilometer) [53]	36
Abbildung 15: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von PKW [58].....	37
Abbildung 16: Modell der Kreislaufwirtschaft: weniger Rohstoffe, weniger Abfall, weniger Emissionen [62]	40
Abbildung 17: Vor- und Nachteile BEVs und ICEVs	51
Abbildung 18: Gesamtbewertung der Ressourcennutzung	53
Abbildung 19: Gesamtbewertung der CO2-Bilanz	54
Abbildung 20: Gesamtbewertung	55

Abbildung 21: Visualisierung der Unsicherheiten	57
Abbildung 22: Zusammenhänge der Handlungsempfehlungen für nachhaltige Mobilitätsstrategien.....	63

Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
BEV	Batterieelektrische Fahrzeuge
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DUH	Deutsche Umwelthilfe
E-Fuel	Electrofuel
E-Auto	Elektrofahrzeug
EU	Europäische Union
et. al.	und andere
g	Gramm
ICEV	Verbrennungsmotorfahrzeuge
ISO – Norm	Internationale Organisation für Normung
IEA	Internationale Energieagentur
kWh	Kilowattstunde
kg	Kilogramm
l	Liter
LCA	Lebenszyklusanalyse
NO _x	Stickoxide
o. V.	ohne Verfasser
o. J.	ohne Jahr
PKW	Personenkraftwagen
SUV	Sport Utility Vehicles
vs.	versus
vgl.	Vergleich

1 Einleitung

Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts spielte die Elektromobilität eine bedeutende Rolle, da die Anzahl der batteriebetriebenen Fahrzeuge doppelt so hoch war wie die der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Doch gegen Ende der 1920er-Jahre verloren Elektroautos zunehmend an Bedeutung und traten in den Hintergrund. Heute erleben sie durch das wachsende Umweltbewusstsein eine beeindruckende Rückkehr und knüpfen an ihre frühere Geschichte an. [1]

In den letzten Jahren hat sich die Elektromobilität als Schlüsseltechnologie zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und zur Förderung nachhaltiger Mobilität etabliert [2]. Mit steigenden Nachfragen nach umweltfreundlicheren Verkehrslösungen rücken batterieelektrische Fahrzeuge zunehmend in den Fokus. Trotz der vielen Vorteile von BEVs, wie beispielsweise die emissionsfreie Nutzung und die geringere Geräuschentwicklung im Vergleich zu Verbrennungsmotorfahrzeugen, bleiben wesentliche Fragen zur Bewertung ihrer Nachhaltigkeit offen. Dabei stehen nicht nur die Emissionen während der Nutzung im Vordergrund, sondern auch der Ressourcenverbrauch und die ökologische Auswirkungen, die durch Produktion, Betrieb und Entsorgung entstehen [3]. Auch Rohstoffe wie Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit rücken zunehmend in den Fokus, da ihr Abbau, ihre Verfügbarkeit und die Möglichkeiten zur Wiederverwertung die Umweltbilanz batterieelektrischer Fahrzeuge maßgeblich beeinflussen. [4]

1.1 Problemstellung

Auch wenn der Bestand an Elektroautos in den letzten Jahren innerhalb der Europäischen Union deutlich gestiegen ist, machen die konventionellen Fahrzeuge nach wie vor den Großteil des globalen Fahrzeugbestandes aus. [76]

BEVs werfen in Bezug auf ihren Lebenszyklus Fragen auf, insbesondere im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch, die CO₂-Emissionen und die Umweltbilanz. Während die Nutzung von BEVs mit deutlich geringeren Emissionen verbunden ist, entstehen während der Produktion, insbesondere bei der Herstellung der Batterie, hohe Umweltbelastungen, die oft übersehen werden. Zudem stellt die Verfügbarkeit von Rohstoffen, die vor allem für die Produktion der Batterien notwendig sind, ein potenzielles Risiko für die langfristige

Nachhaltigkeit dar. Zudem ist unklar, wie der unterschiedliche Energiemix in verschiedenen Regionen innerhalb der Europäischen Union, die CO₂-Bilanz von BEVs beeinflusst und wie die Recyclingstrategien zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks beitragen können. Vor diesem Hintergrund stellt sich nun die Frage, wie sich BEVs im Vergleich zu ICEVs hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit über den gesamten Lebenszyklus hinweg positionieren. Es gilt, die relevanten Ressourcen und Emissionen während der Produktion, der Nutzung und der Entsorgung zu bewerten und zu vergleichen, um fundierte Aussagen über langfristige Umwelt- und Ressourcenschonung treffen zu können. Die Antworten auf diese Fragen sind entscheidend für die zukünftige Gestaltung von Mobilitätsstrategien.

1.2 Zielsetzung

Daher besteht das Ziel dieser Bachelorarbeit darin, eine fundierte Nachhaltigkeitsbewertung von batterieelektrischen Fahrzeugen im Vergleich zu Verbrennungsmotorfahrzeugen vorzunehmen, wobei der Schwerpunkt auf den relevanten Nachhaltigkeitskriterien liegt. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus beider Antriebstechnologien berücksichtigt, einschließlich der Analyse von Ressourcenverbrauch, Emissionen und Recyclingfähigkeit. Darüber hinaus wird untersucht, welchen Einfluss der europäische Energiemix auf die Nachhaltigkeit batterieelektrischer Fahrzeuge hat. Da die Herkunft der Energie eine entscheidende Rolle für die Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen spielt, soll in dieser Arbeit herausgearbeitet werden, inwiefern unterschiedliche Stromquellen die Nachhaltigkeit beeinflussen. Ein weiterer zentraler Aspekt dieser Untersuchung ist die kritische Betrachtung der für die Batterieproduktion benötigten Rohstoffe – insbesondere Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit. Hierbei wird sowohl ihre Verfügbarkeit als auch ihre Umweltwirkung analysiert, um ein umfassendes Bild der ökologischen und sozialen Herausforderungen zu erhalten.

Schließlich verfolgt die Arbeit das Ziel, geeignete Bewertungskriterien zu entwickeln, die eine fundierte Analyse ermöglichen. Dadurch sollen die Vor- und Nachteile der beiden Antriebstechnologien im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit systematisch herausgearbeitet und verglichen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage für die Entscheidungsfindung bei der Gestaltung zukünftiger Mobilitätsstrategien dienen.

In diesem Kontext ist die Arbeit in drei Teile gegliedert, bestehend aus einem Einleitungskapitel, Hauptkapitel und Schlusskapitel. Der erste Teil der Arbeit umfasst den theoretischen Teil. Der theoretische Teil bietet eine wissenschaftlich fundierte Form der Auseinandersetzung mit der Entwicklung der beiden Antriebstechnologien, sowie dem Aufbau und der Funktionsweise von batterieelektrischen Fahrzeugen und Verbrennungsmotorfahrzeugen. Es ist hervorzuheben, dass es sich um eine qualitative sowie quantitative Untersuchung beziehungsweise Gegenüberstellung handelt, die als solche nur einen begrenzten Umfang aufweist, sodass lediglich ausgewählte Bewertungskriterien und Aspekte behandelt werden. Die theoretische Auseinandersetzung dieser Arbeit beginnt mit einem Rückblick und Ausblick der Elektromobilität und konventionellen Antriebstechnologien, indem ein Einblick über die Entwicklung gegeben wird.

Anschließend wird versucht eine Definition zu dem Begriffsgebrauch Nachhaltigkeitsbewertung im Allgemein zu geben, um eine fundierte Basis für das Verständnis und dessen Bedeutung zu legen. In diesem Kontext wird nachfolgend auf Nachhaltigkeitskriterien eingegangen, sowie die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, die für den weiteren Verlauf dieser Arbeit relevant sind.

Darauf folgt der zweite Teil der Arbeit. In diesem Kapitel werden Bewertungskriterien dargestellt, um eine qualitative und quantitative Gegenüberstellung der beiden Antriebstechnologien zu ermöglichen. Des Weiteren wird die Analyse der Lebenszyklen von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung und dem Recycling aufgeführt, dargestellt und verglichen.

Zum Abschluss folgt der dritte Teil der Arbeit, in dem zunächst die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt werden. Hierbei wird auf verschiedene Themenaspekte eingegangen, die hinsichtlich des Forschungsanliegens relevant erscheinen. Im Anschluss erfolgt eine detaillierte Ergebnisdarstellung, bei der geprüft wird, inwieweit sie mit den theoretischen Annahmen übereinstimmen oder ob neue Erkenntnisse gewonnen werden können. Im letzten Kapitel der Arbeit wird das Fazit vorgestellt, indem die zentralen Erkenntnisse zusammengefasst und in Hinblick auf die Nachhaltigkeitsbewertung beantwortet werden. Abschließend erfolgt ein Ausblick, in dem auf Handlungsempfehlungen für zukünftige Mobilitätsstrategien eingegangen wird.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Entwicklung der Elektromobilität und konventioneller Antriebstechnologien

Die Entwicklung der Elektromobilität und die der konventionellen Antriebstechnologien hat sich über viele Jahrzehnten hinweg erheblich verändert, wobei jeder Ansatz eigene Stärken und Herausforderungen mit sich brachte.

Die Elektromobilität begann bereits im 19. Jahrhundert, verlor jedoch aufgrund der überlegenen Stellung der Verbrennungsmotoren für lange Zeit an Bedeutung. Erst gegen Ende des 20. Jahrhunderts, angesichts wachsender Umweltbedenken und der Notwendigkeit zur Reduktion von CO₂-Emissionen, erlangte sie zunehmend an Relevanz. Der technologische Fortschritt bei Batterien, speziell die Entwicklung der Lithium-Ionen-Akkus, stellte einen entscheidenden Wendepunkt dar. Diese Akkus ermöglichen es, Elektrofahrzeuge mit ausreichender Reichweite und angemessenen Ladezeiten auf den Markt zu bringen.

Zudem förderten gesetzliche Vorgaben zur Reduktion von Schadstoffemissionen, insbesondere in städtischen Gebieten, die Nachfrage nach Elektroautos. Heute werden Elektrofahrzeuge als zukunftssträchtige Alternative angesehen, die dank moderner Ladeinfrastruktur und zunehmend verbesserter Batterietechnologien immer attraktiver werden. [5]

Die Umstellung von fossilen Brennstoffen hin zu Elektrizität aus erneuerbaren Quellen stellt einen entscheidenden Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Mobilität dar. Im Gegensatz dazu dominierte der Verbrennungsmotor über 100 Jahre die Automobilindustrie. [6] Vom ersten Benzinauto bis zu modernen Diesel- und Ottomotoren wurden ständig Verbesserungen in Bezug auf Leistung, Kraftstoffeffizienz und Emissionsminderung erzielt. Der Verbrennungsmotor basiert auf der Umwandlung von chemischer Energie in mechanische Energie durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen.

Trotz der hohen Effizienz und Reichweite, die Verbrennungsmotoren bieten, sind sie jedoch auch verantwortlich für erhebliche Umweltprobleme, insbesondere in Bezug auf Luftverschmutzung und CO₂-Emissionen. In den letzten Jahrzehnten wurden Diesel- und

Ottomotoren weiter optimiert, um strikteren Umweltvorgaben gerecht zu werden. Hierzu gehören Technologien wie Turbolader, Direkteinspritzung und Abgasreinigungssysteme. Dennoch stehen konventionelle Antriebe zunehmend in der Kritik, besonders in Bezug auf den Klimawandel und die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe. [7, S.694]

2.2 Aufbau und Funktionsweise von batterieelektrischen Fahrzeugen

Ein batterieelektrisches Fahrzeug ist ein Fahrzeug, dass ausschließlich durch elektrische Energie aus einer Batterie angetrieben wird. Der Elektromotor treibt die Räder an und die Energie, die dafür benötigt wird, wird in einer wieder aufladbaren Batterie gespeichert. [8, S.10] Im Unterschied zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verzichten BEVs somit vollständig auf fossile Brennstoffe und erzeugen während der Fahrt keine direkten Emissionen. Ihr Aufbau und ihre Funktionsweise sind speziell auf Effizienz und Nachhaltigkeit ausgelegt.

Der zentrale Bestandteil eines BEVs ist die Lithium-Ionen-Batterie, die elektrische Energie speichert und an den Elektromotor weitergibt. Sie befindet sich meist im Fahrzeugboden, was den Schwerpunkt des Autos senkt und die Stabilität verbessert. Die Batterie beeinflusst maßgeblich die Reichweite und kann an verschiedenen Ladeeinrichtungen aufgeladen werden, wie beispielsweise an Schnellladestationen und herkömmlichen Steckdosen. [8, S.13]

Der Elektromotor bildet das zentrale Element des Antriebssystems und treibt das Fahrzeug durch die direkte Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Bewegung an. Er wandelt somit elektrische Energie in mechanische Energie um, die direkt auf die Räder übertragen wird. [9] Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren bietet der Elektromotor sofortiges Drehmoment, was eine schnelle und direkte Beschleunigung ermöglicht.

Die Leistungselektronik übernimmt die Steuerung des Energieflusses zwischen Batterie und Motor. Sie steuert sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung und ermöglicht es, beim Bremsen Energie zurück in die Batterie zu laden. Dieser Prozess, auch Rekuperation genannt, trägt zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz des Fahrzeugs bei. [10] Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, ermöglicht die Rekuperation die Rückgewinnung von Energie beim Bremsen. Dadurch wird die Effizienz des Fahrzeugs

gesteigert und die Reichweite erhöht, da ein Teil der verbrauchten Energie wieder in die Batterie zugeführt wird.

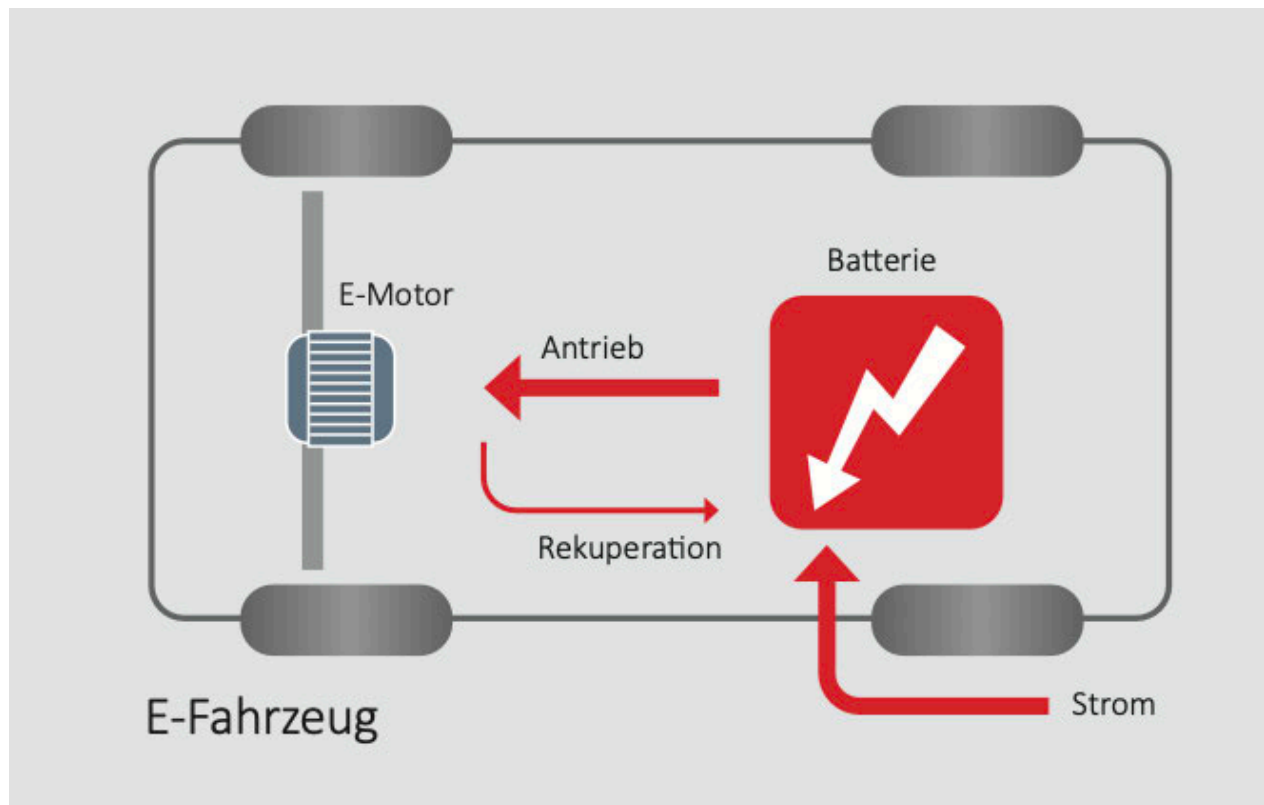


Abbildung 1: Rekuperation der batterieelektrischen Fahrzeuge [8]

Zusätzlich verfügen batterieelektrische Fahrzeuge über ein Thermomanagementsystem, das sowohl die Batterie als auch den Innenraum temperiert. Dies ist wichtig, um die Lebensdauer der Batterie zu verlängern und den Energieverbrauch für Heizung oder Kühlung zu optimieren. [11]

Der Aufbau eines batterieelektrischen Fahrzeugs bildet die Grundlage für seine Funktionsweise, indem die einzelnen Elemente wie Batterie, Elektromotor und Leistungselektronik eng miteinander verknüpft sind.

Ein BEV wird durch elektrische Energie betrieben, die der Elektromotor direkt in Bewegung umsetzt. Beim Beschleunigen versorgt die Batterie das Fahrzeug mit Energie. Beim Bremsen wird ein Teil der Bewegungsenergie zurückgewonnen und in die Batterie zurückgeführt. Diese Rückgewinnung von Energie, auch als regenerative Bremse bekannt, erhöht die Effizienz des Fahrzeugs. [10] Im Betrieb sind BEVs nahezu geräuschlos und verursachen keine direkten Abgase. [12]

Ein wesentlicher Vorteil von BEVs ist ihre einfache Wartung. Da sie weniger bewegliche Teile als ICEVs haben, fallen geringere Wartungskosten an. Herausforderungen bestehen jedoch in der noch begrenzten Ladeinfrastruktur und der Ladezeit, die jedoch durch den Ausbau von Schnellladestationen zunehmend verkürzt wird. Wie bereits erwähnt, stellen BEVs eine zukunftsweisende Alternative zu konventionellen Fahrzeugen dar. Es konnte herausgearbeitet werden, dass sie hohe Effizienz, emissionsfreien Betrieb und eine einfache Wartung bieten. Trotz der genannten Herausforderungen, wie Ladeinfrastruktur und den Anschaffungskosten, ist die Technologie auf dem Aufschwung und wird durch technologische Fortschritte stetig weiterentwickelt. [10]

2.3 Aufbau und Funktionsweise von Verbrennungsmotorfahrzeugen

Ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor nutzt fossile Brennstoffe wie Benzin oder Diesel, um mechanische Energie zu erzeugen. Der Motor funktioniert durch die Verbrennung von Kraftstoff in einem geschlossenen Zylindersystem. Diese Energieumwandlung erfolgt in mehreren Schritten. Hierbei wird chemische Energie in mechanische Bewegung durch die Verbrennung von Kraftstoff umgewandelt. [13] Der Aufbau eines Verbrennungsmotors besteht aus mehreren Elementen. Dies ist auch in Abbildung 2 erkennbar. Deutlich erkennbar ist ebenfalls die Zündkerze, die Ventile, der Kolben sowie die Kurbelwelle mit der Pleuelstange.

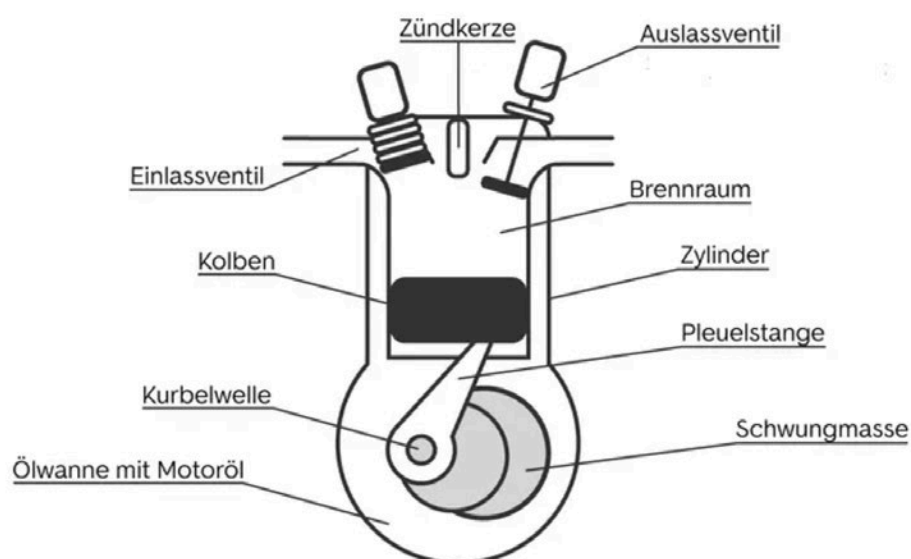


Abbildung 2: Der Aufbau des Verbrennungsmotors [13]

Der Motor selbst setzt sich in der Regel aus mehreren Zylindern zusammen und kann in verschiedenen Varianten, wie dem Otto- oder Dieselmotor, vorliegen. Der Kraftstoffmechanismus umfasst die Systeme zur Speicherung und Einspritzung des Kraftstoffs. Eine Pumpe transportiert den Kraftstoff aus dem Tank zu den Einspritzdüsen, wo er mit Luft vermischt wird, um eine effiziente Verbrennung zu gewährleisten. In diesem Prozess wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch unter hohem Druck entzündet, wodurch Energie freigesetzt wird. [13]

Diese Energie wird in mechanische Arbeit umgewandelt, indem die Motorkolben durch die Ausdehnung des Gases in Bewegung versetzt werden. Die Kolben übertragen die entstehende Kraft über den Antriebsstrang auf die Räder des Fahrzeugs. Die Zylinderanordnung kann je nach Motortyp variieren, etwa als Rotationskolben im Wankelmotor oder als Hubkolben, wie sie in den meisten heutigen Fahrzeugen mit Vier-Takt-Motoren verwendet werden. [13]

Ein weiteres wichtiges Element ist das Abgassystem, das die Entsorgung der verbrannten Gase übernimmt. Es wird durch einen Katalysator unterstützt, der schädliche Emissionen reduziert. Das Kühlsystem verhindert Überhitzung, indem es die durch die Verbrennung entstehende Wärme ableitet, und sorgt für die notwendige Temperaturregelung. Schließlich ermöglicht das Getriebe die Übertragung der mechanischen Energie des Motors auf die Räder, entweder manuell oder automatisch. [14]

Der Verbrennungsmotor arbeitet in einem Vier-Takt-Zyklus. Dies ist deutlich in Abbildung 3 zu sehen. Es zeigt, dass der Kolben in vier Phasen bewegt wird: Zuerst wird im Ansaugtakt Luft und Kraftstoff in den Zylinder gezogen. Im Verdichtungsakt wird dieses Gemisch anschließend stark komprimiert. Sobald das Gemisch gezündet wird, kommt es zu einer Explosion, die den Kolben im Arbeitstakt nach unten bewegt und mechanische Energie erzeugt. Schließlich werden im Ausschiebetakt die Abgase aus dem Zylinder ausgestoßen. [15, S.51]

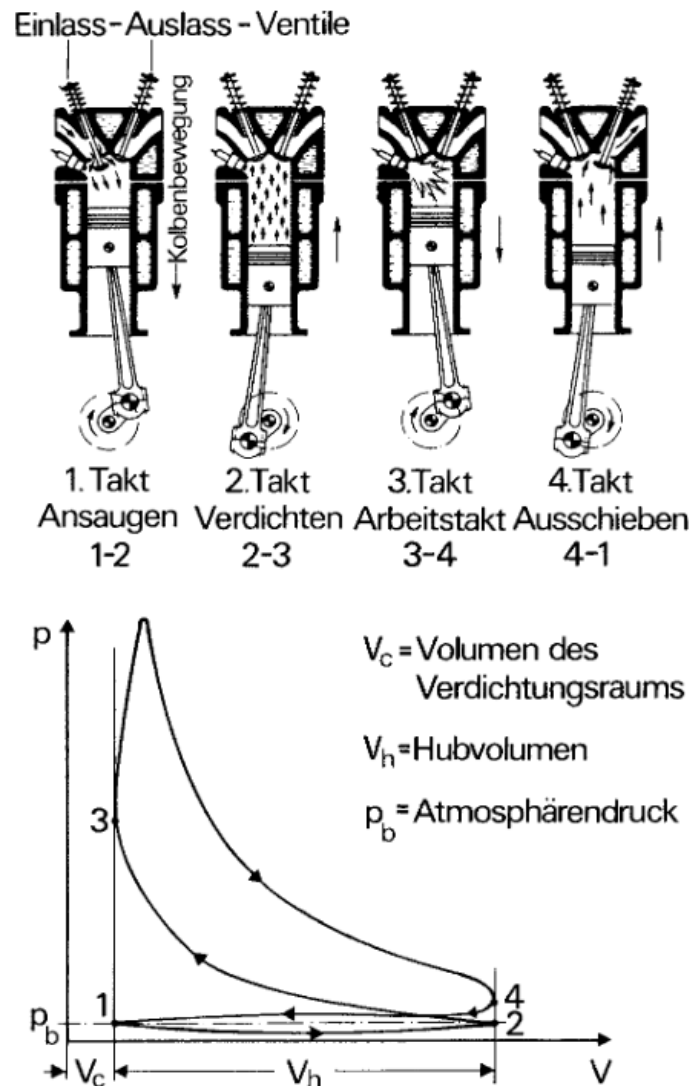


Abbildung 3: Viertaktverfahren [15, S.51]

Der beschriebene Zyklus wiederholt sich kontinuierlich, um die Antriebsenergie für das Fahrzeug zu erzeugen. Insgesamt sind Verbrennungsmotoren aufgrund ihrer hohen Effizienz und der bestehenden Infrastruktur nach wie vor weit verbreitet.

2.4 Definition und Relevanz der Nachhaltigkeitsbewertung

Um eine fundierte Nachhaltigkeitsbewertung durchführen zu können, ist es zunächst wichtig, den Begriff klar zu definieren und die unterschiedlichen Bewertungsmethoden darzustellen. Dies schafft eine theoretische Grundlage und gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Herangehensweisen.

Im Anschluss daran wird der Fokus auf die Methode der Lebenszyklusanalyse (LCA) gelegt, da diese im folgenden Kapitel als zentrale Bewertungsmethode herangezogen wird. Die Lebenszyklusanalyse ermöglicht eine umfassende Betrachtung, indem sie die ökologischen Auswirkungen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produkts oder Prozesses bewertet und sich somit für die nachfolgende Analyse eignet.

Die Nachhaltigkeitsbewertung ist ein Verfahren zur Analyse der ökologischen, sozialen und ökonomischen Auswirkungen von Aktivitäten, Prozessen und Produkten. Ihr Ziel ist es zu prüfen, inwieweit getroffene Entscheidungen im Einklang mit den Prinzipien der nachhaltigen Entwicklung stehen. Diese Prinzipien orientieren sich daran, den Anforderungen unserer Zeit gerecht zu werden, ohne dabei die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu gefährden und gleichzeitig auch ihre eigenen Bedürfnisse zu decken. [16]

Die Nachhaltigkeitsbewertung umfasst drei zentrale Bereiche. Ein zentraler Bestandteil ist die ökologische Dimension. Sie betrachtet, wie sich menschliche Aktivitäten auf die Umwelt auswirken. Dazu gehören Aspekte wie der Verbrauch natürlicher Ressourcen, Emissionen und die Entstehung von Abfällen. Das Ziel hierbei ist, die Belastung für die Umwelt zu minimieren. [17]

Neben der ökologischen Perspektive spielt die ökonomische Dimension eine entscheidende Rolle. Sie analysiert die Wirtschaftlichkeit und langfristige Rentabilität von Prozessen und Produkten. Dazu zählen die effiziente Nutzung von Ressourcen, die Schaffung von Arbeitsplätzen und die Sicherung wirtschaftlicher Stabilität. Wirtschaftlicher Erfolg sollte dabei im Einklang mit den ökologischen und sozialen Zielen stehen. [17]

Die soziale Dimension der Nachhaltigkeitsbewertung fokussiert sich auf die Auswirkung von Aktivitäten auf die Gesellschaft. Hierzu zählen Themen wie soziale Gerechtigkeit, die Einhaltung von Menschenrechten und die Förderung der Lebensqualität. Es wird also geprüft, inwieweit Handlungen zur Verbesserung des sozialen Zusammenhalts und zur Erhaltung der gesellschaftlichen Werte beitragen. [17]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Nachhaltigkeitsbewertung darauf abzielt, eine ganzheitliche Betrachtung aller relevanten Aspekte zu ermöglichen. Es dient

als eine Art Instrument, um fundierte Entscheidungen zu treffen, die eine zukunftsfähige und verantwortungsvolle Entwicklung fördern. Die Bedeutung der Nachhaltigkeitsbewertung hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Dies ist auf ein wachsendes Bewusstsein für globale Herausforderungen wie den Klimawandel und die Verknappung natürlicher Ressourcen zurückzuführen. Durch den Einsatz des Bewertungsinstruments können Unternehmen nicht nur ihren ökologischen Fußabdruck reduzieren, sondern auch Risiken frühzeitig erkennen und zukunftsfähige Strategien entwickeln.

2.5 Lebenszyklusanalyse (LCA)

Die Lebenszyklusanalyse, auch bekannt als Ökobilanz, ist eine zentrale Methode der Nachhaltigkeitsbewertung. Die Methode untersucht die Umweltwirkungen eines Produkts über den gesamten Lebenszyklus. Dieser Lebenszyklus umfasst alle Phasen, von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung oder dem Recycling [18, S.345]. Eine Ökobilanz stellt eine wichtige Methode zur Beschreibung und Bestimmung der Umweltlasten von Systemen dar und ist bisher das einzige weltweit in einer ISO-Norm standardisierte Instrument der Bewertung [22, S.17].

Die Lebenszyklusanalyse umfasst vier Elemente, auf die im weiteren Verlauf näher drauf eingegangen wird. Im Prozess der Lebenszyklusanalyse wird zunächst das Ziel und der Untersuchungsrahmen definiert. Es wird festgelegt, welches Produkt bewertet werden soll und welche Umweltauswirkungen berücksichtigt werden [18, S. 345]. Anschließend folgt die Sachanalyse, bei der alle relevanten Material- und Energieflüsse des Produkts erfasst werden. Hierbei werden auch der Ressourcenverbrauch, die Emission und das Recycling in jeder Lebenszyklusphase berücksichtigt.

In der Wirkungsabschätzung werden die gesammelten Daten bewertet, um die potenziellen Umweltauswirkungen zu bestimmen. Dabei können Klimawandel, menschliche Gesundheit und die Ressourcenverfügbarkeit in Betracht gezogen werden. [18, S. 346]

Der abschließende Auswertungsprozess fasst die Ergebnisse zusammen, prüft die Zielerreichung und liefert die Basis für Entscheidungen zur Verbesserung der Umwelt. [18, S. 346]

An dieser Stelle sollte hervorgehoben werden, dass die einzelnen Elemente direkt voneinander abhängig sind. Die Abbildung 4 veranschaulicht die Abhängigkeit der einzelnen Elemente und zeigt ebenfalls die einzelnen Phasen der Lebenszyklusanalyse.

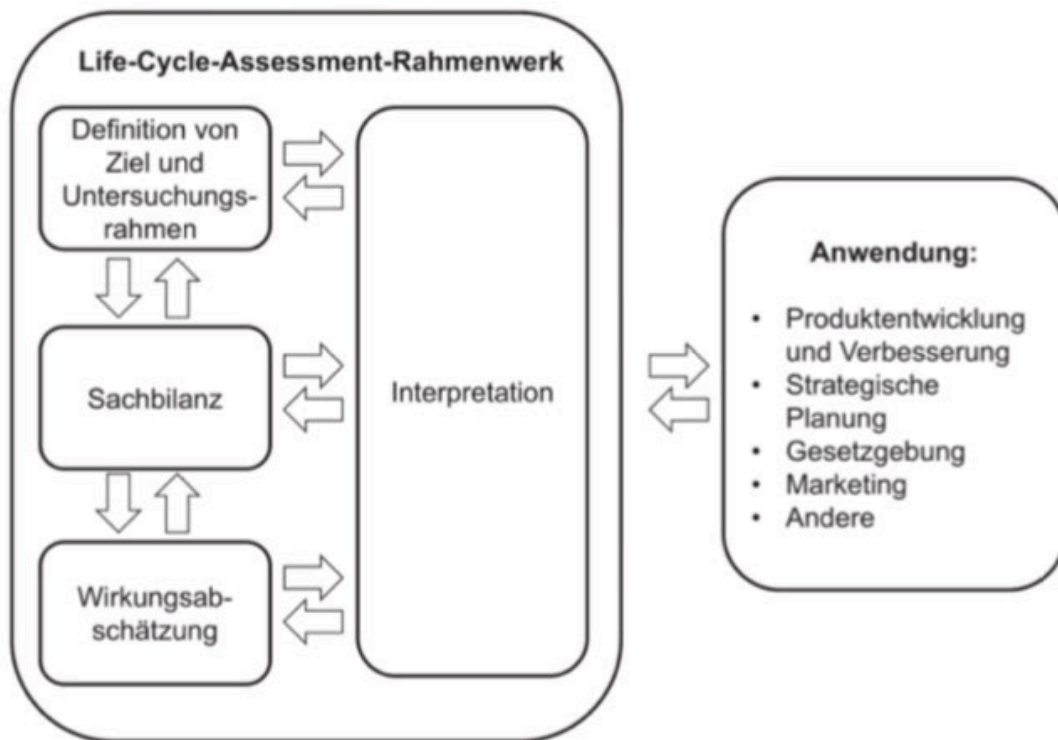


Abbildung 4: Elemente der Lebenszyklusanalyse [18, S. 346]

Die Relevanz der Lebenszyklusanalyse ist in den letzten Jahren gewachsen, da immer mehr Unternehmen und auch Verbraucher ihren Fokus auf nachhaltige Produkte und Dienstleistungen legen. Diese Methode liefert eine fundierte Grundlage für Entscheidungsprozesse, da sie eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltauswirkungen ermöglicht, die oft über den Produktionsprozess hinausgeht. Besonders in der Produktentwicklung und im Designprozess wird die Lebenszyklusanalyse eingesetzt, um den Ressourcenverbrauch zu minimieren und Umweltauswirkungen zu verringern.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld ist die Vergleichsanalyse, bei der Unternehmen mit Hilfe der Lebenszyklusanalyse, die Umweltfreundlichkeit unterschiedlicher Produkte vergleichen und optimieren können. Zudem unterstützt die Methode dabei gesetzliche Umweltvorgaben, wie Umweltzertifizierungen oder Emissionsvorgaben, zu erfüllen und wird auch durch internationale Standards wie der ISO 14040 und ISO 14044 unterstützt. [18, S. 345] Die LCA nach DIN EN ISO 14040 und 14044 dient dazu, die potenziellen

Umweltauswirkungen eines Produktsystems über den gesamten Lebensweg zu beurteilen. [19]

Die Analyse von batteriebetriebenen Fahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ist ein Beispiel für den Einsatz von Lebenszyklusanalysen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird in Kapitel vier diese Analyse vollzogen. Hierbei wird ein Fahrzeug von der Produktion der Batterie bis hin zum Recycling des Fahrzeugs betrachtet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Lebenszyklusanalyse eine unverzichtbare Methode zur Förderung nachhaltiger Entwicklung darstellt, da es eine umfassende Analyse der Umweltauswirkungen bietet. Zudem trägt die systematische Analyse dazu bei fundierten Entscheidungen zu treffen.

3 Methodik der Nachhaltigkeitsbewertung

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Nachhaltigkeitsbewertung vorgestellt, die als Grundlage für die spätere Analyse dient.

3.1 Bewertungskriterien

Die Bewertung erfolgt anhand der drei zentralen Kriterien, CO₂-Emissionen, Ressourcenverbrauch und Recyclingfähigkeit. Ziel ist es, eine vergleichbare und strukturierte Beurteilung der beiden Fahrzeugtypen zu ermöglichen, indem die Umwelt- und Ressourcenauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge analysiert werden.

Zur Bewertung wird eine Kombination aus qualitativer und quantitativer Analyse herangezogen. Qualitativ werden die Umwelt- und Ressourcenauswirkungen beschrieben und eingeordnet, bezugnehmend auf wissenschaftliche Studien und Berichten. Quantitativ fließen Messwerte mit CO₂-Emissionen in Gramm pro Kilometer, Energieverbrauch in Kilowattstunde oder Recyclingquoten in Prozent ein. Die Ergebnisse werden so aufbereitet, dass ein direkter Vergleich zwischen konventionellen und batteriebetriebenen Fahrzeugen möglich ist.

Durch die Kombination beider Ansätze wird eine fundierte und umfassende Bewertung gewährleistet. Die qualitative Analyse bietet den Kontext und die Einordnung der Ergebnisse, während die quantitative Analyse die Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse darstellt.

Die Abbildung 5 bietet eine bildhafte Darstellung der methodischen Vorgehensweise. Sie veranschaulicht die kombinierte qualitativ-quantitative Herangehensweise sowie die Einbindung der ausgewählten Bewertungskriterien. Dabei werden die drei zentralen Kriterien – CO₂-Emissionen, Recyclingfähigkeit und Ressourcenverbrauch – berücksichtigt und ihre Einbindung in die Nachhaltigkeitsbewertung anschaulich dargestellt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird ausführlich auf diese Kriterien eingegangen.

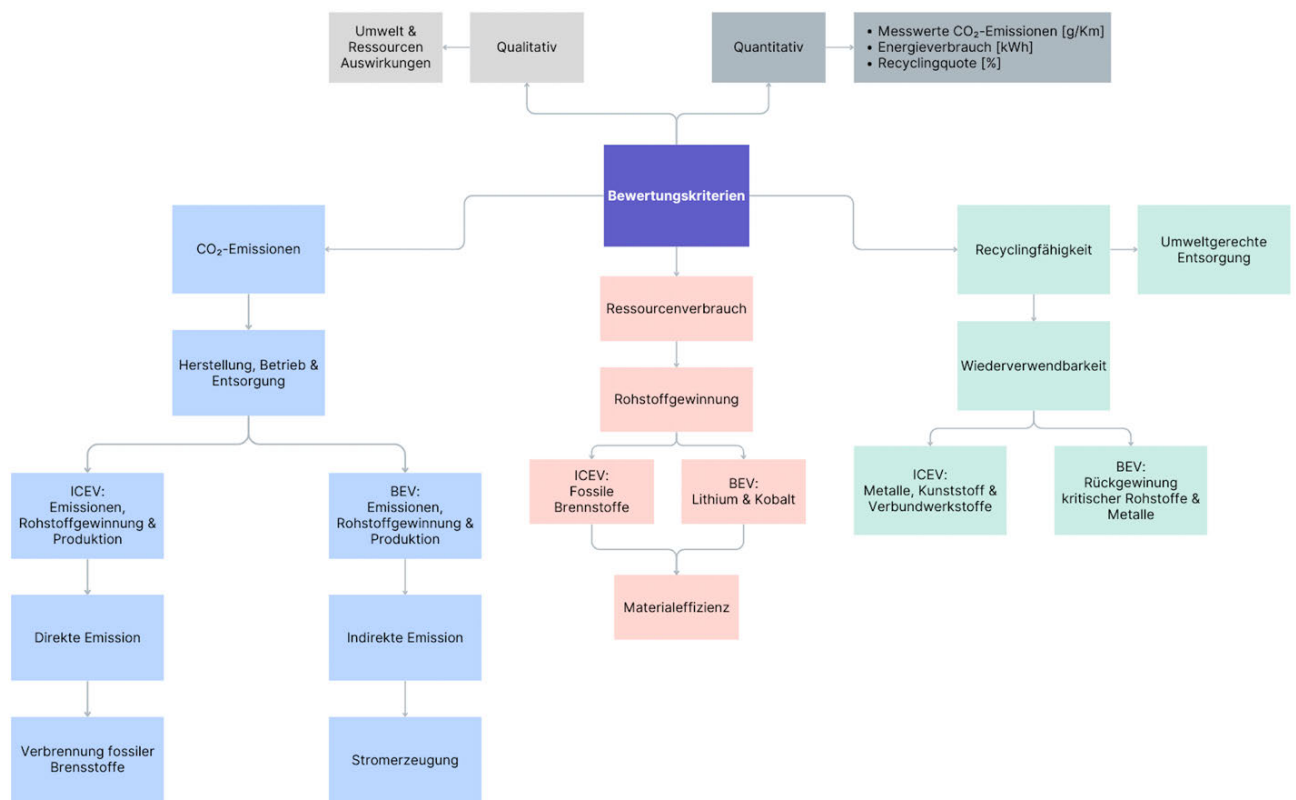


Abbildung 5: Concept Map zur Darstellung der methodischen Vorgehensweise

3.1.1 CO₂-Emissionen

Für die CO₂-Emissionen wird der Lebenszyklus der Fahrzeuge in die Bereiche Herstellung, Betrieb und Entsorgung unterteilt. In der Herstellung werden die Emissionen betrachtet, die bei der Rohstoffgewinnung und der Produktion anfallen, wobei bei batteriebetriebenen Fahrzeugen die Batterieproduktion eine besondere Rolle spielt. Im Betrieb werden direkte Emissionen, wie sie bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe auftreten und indirekte Emissionen, die durch Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge entstehen, untersucht. Für die Entsorgung wird analysiert, welche CO₂-Emissionen durch Recycling und andere Verwertungsprozesse verursacht werden. [20]

3.1.2 Ressourcenverbrauch

Der Ressourcenverbrauch umfasst ebenfalls den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs. Bei der Rohstoffgewinnung werden die für die Fahrzeugproduktion benötigten Materialien, wie fossile Brennstoffe bei konventionellen Fahrzeugen oder Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit bei batteriebetriebenen Fahrzeugen, berücksichtigt.

Während des Betriebs wird der direkte Ressourcenverbrauch, durch den Einsatz von Treibstoffen oder die Nutzung von Stromquellen, analysiert. Zusätzlich wird die Materialeffizienz bewertet. [18, S. 345] Dabei wird geprüft, wie nachhaltig die eingesetzten Ressourcen genutzt und verarbeitet werden.

3.1.3 Recyclingfähigkeit

Die Recyclingfähigkeit wird anhand der Möglichkeit bewertet, Materialien am Ende der Lebensdauer des Fahrzeugs wiederzuverwenden oder umweltgerecht zu entsorgen. Dabei wird untersucht, wie effizient Metalle wie Stahl und Aluminium recycelt werden können. Für batteriebetriebene Fahrzeuge liegt der Fokus auf der Rückgewinnung kritischer Rohstoffe wie Lithium, Nickel und Kobalt aus Batterien. Zudem wird die Wiederverwertbarkeit von Kunststoffen und Verbundwerkstoffen betrachtet, die oft weniger nachhaltig recycelt werden können. [21]

4 Analyse der Lebenszyklen

Die Analyse folgt der Struktur der vier Phasen der Lebenszyklusanalyse, die sich wie folgt unterteilen lassen: Zieldefinition und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Umweltauswirkungen von BEVs und ICEVs über den gesamten Lebenszyklus detailliert analysiert, interpretiert und dargestellt.

4.1 Batterieelektrische Fahrzeuge

Der Lebenszyklus von batterieelektrischen Fahrzeugen umfasst mehrere zentrale Phasen, die ihre Umweltbilanz beeinflussen. In diesem Kapitel stehen die Rohstoffgewinnung und die Batteriefertigung im Fokus, da hierbei wichtige Ressourcen wie Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit benötigt werden. [23, S.28f.] Während der Nutzung spielt der Energiemix eine entscheidende Rolle, da die Klimabilanz stark von der Herkunft des Ladestroms abhängt. Am Ende des Lebenszyklus rücken Recyclingstrategien und Rohstoffkreisläufe in den Mittelpunkt, um wertvolle Materialien zurückzugewinnen und Ressourcen zu schonen. Im Folgenden wird der gesamte Lebenszyklus analysiert, um nachhaltige Ansätze für die Mobilität der Zukunft aufzuzeigen.

4.1.1 Rohstoffgewinnung und Batteriefertigung

Die Lebenszyklusanalyse beginnt mit der Betrachtung der Rohstoffgewinnung und der Batteriefertigung, da diese Prozesse zentrale Kriterien für die Bewertung der Umweltbilanz darstellen. Das Ziel dieser Analyse ist es, die Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung und der Batteriefertigung bei batterieelektrischen Fahrzeugen zu untersuchen. Dabei wird in diesem Kapitel der Fokus auf den Ressourcenverbrauch und die CO₂-Emissionen gelegt, die während der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien entstehen, insbesondere in Bezug auf den Abbau von Rohstoffen wie Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit. Die Produktion der Lithium-Ionen-Batterie für batteriebetriebene Fahrzeuge benötigt große Mengen an Rohstoffen, da die Grundlage der Batterien die mineralischen Rohstoffe bilden. Die Gewinnung der Rohstoffe sind mit erheblichen ökologischen und sozialen Herausforderungen verbunden. Lithium wird überwiegend in Lateinamerika (Chile, Argentinien) und Australien gewonnen [23, S.39]. Die Europäische

Union importiert somit den Großteil ihres Lithiums, was eine hohe Abhängigkeit von Drittstaaten bedeutet. Diese Importabhängigkeit verdeutlicht, wie eng europäische Lieferketten mit internationalen Rohstoffquellen verknüpft sind und wie unterschiedlich die ökologischen Rahmenbedingungen in den Herkunftsländern sein können. Insbesondere wird dadurch deutlich, dass in einigen dieser Regionen die Gewinnung von Lithium mit erheblichen Umweltbelastungen einhergeht. Die Lithiumextraktion aus Salzseen verursacht vor allem in ariden Regionen einen erheblichen Wasserverbrauch [23, S.41].

Neben Lithium spielt auch Kobalt eine entscheidende Rolle in der Elektromobilität, wobei dessen Förderung ebenfalls mit erheblichen ökologischen und sozialen Herausforderungen verbunden ist. Kobalt ist derzeit noch ein zentraler Rohstoff der Elektromobilität, doch seine Bedeutung wird künftig voraussichtlich abnehmen. Der Grund dafür liegt in der verstärkten Forschung an kobaltfreien Alternativen für Lithium-Ionen-Akkus, die auf nachhaltigere und weniger kritische Materialien setzen [23, S.42]. Laut der Umfrage von US Geological Survey zeigt die Abbildung 6, dass im Jahre 2023 etwa 74% des weltweit abgebauten Kobalts aus der Demokratischen Republik Kongo stammen, was als problematisch angesehen wird. Dies ist problematisch, da der Kobaltabbau in dieser Region oft mit schweren ethischen und sozialen Problemen wie Kinderarbeit und schlechten Arbeitsbedingungen verbunden ist. [23, S.45]

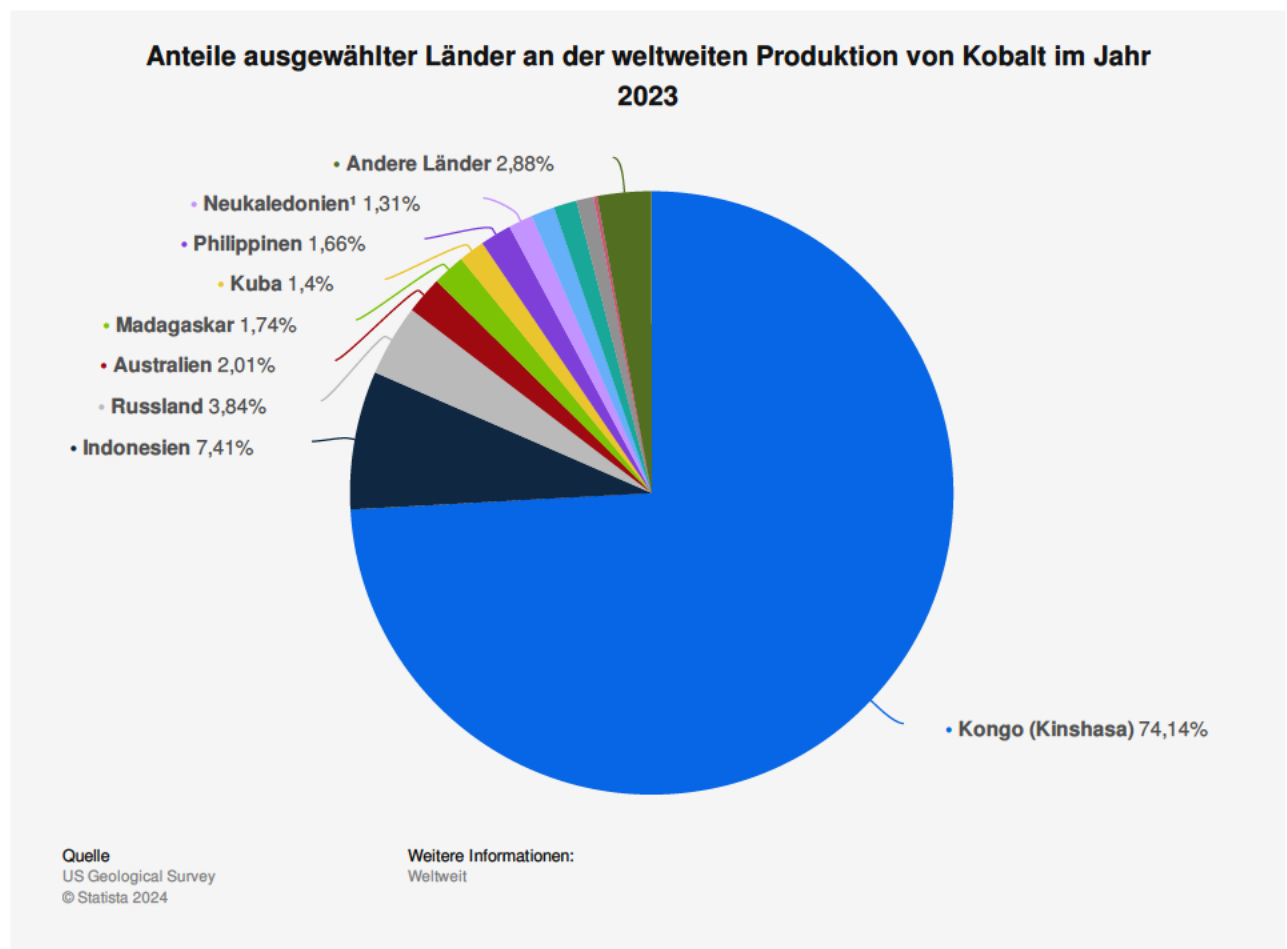


Abbildung 6: Anteile ausgewählter Länder an der weltweiten Produktion von Kobalt im Jahr 2023 [36]

In Kongo herrschen nicht nur problematische Bedingungen wie Kinderarbeit und menschenunwürdige Arbeitsverhältnisse, sondern auch Umweltzerstörungen [23, S.45f.]. Das Ziel besteht darin, die soziale Verantwortung zu verbessern, die Versorgungssicherheit zu erhöhen und vor allem die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen aus solchen Regionen zu reduzieren. Gleichzeitig sollen die Batterien nachhaltiger und kostengünstiger produziert werden. [23, S.46]

Ein weiteres wichtiges Element im Kontext der Rohstoffversorgung ist Nickel. In der Europäischen Union werden jährlich etwa 500.000 Tonnen Nickel eingesetzt. Ein geringer Teil davon wird ebenfalls für Lithium-Ionen-Akkus verwendet und ein noch geringerer Anteil kommt in Lithium-Ionen-Akkus für stationäre Speicher zum Einsatz [23, S.30]. Die Abbildung 7 zeigt die Nachfrage an Nickel für E-Mobilität und für die Anwendungen im Bereich erneuerbarer Energien.

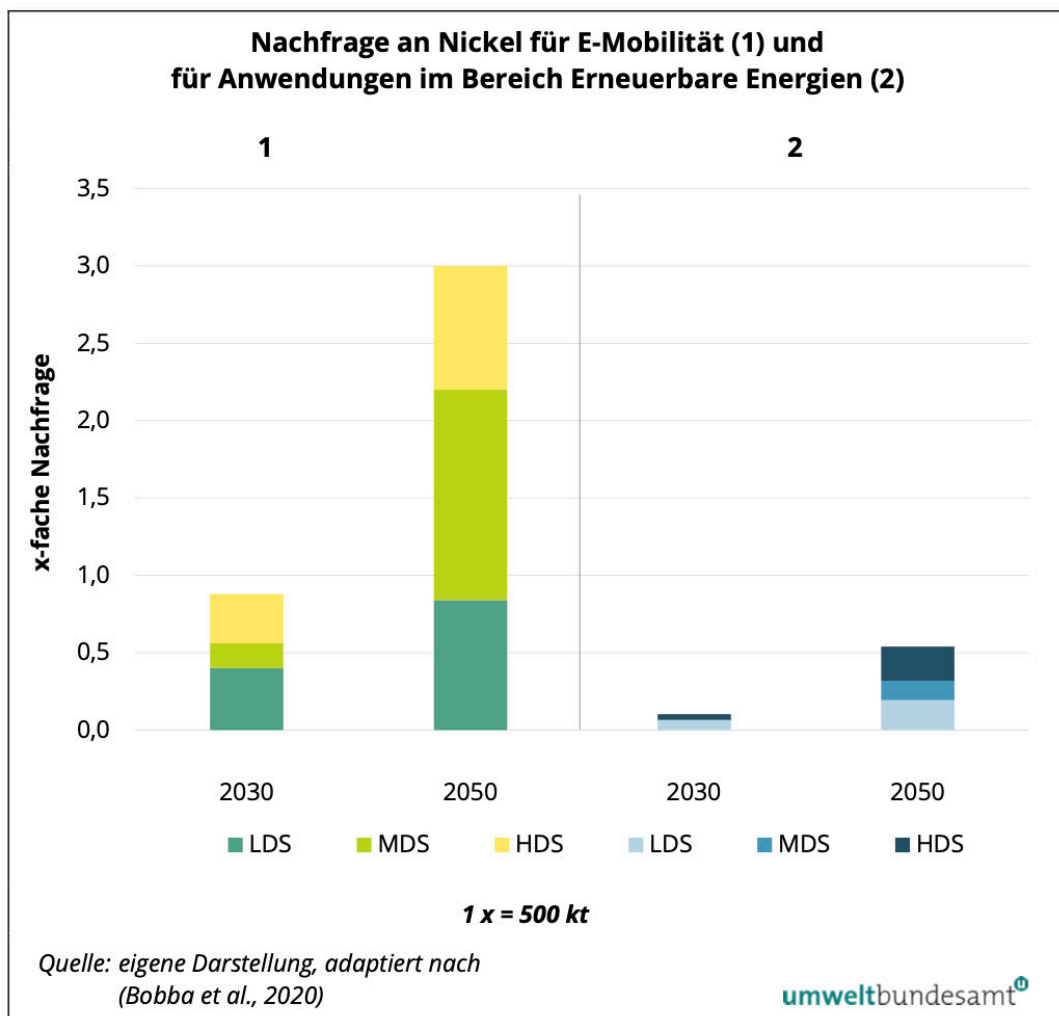


Abbildung 7: Nachfrage an Nickel für E-Mobilität (1) und für Anwendungen im Bereich Erneuerbare Energien (2) [23, S.31]

Durch den Einsatz von Nickel in Akkus für die Elektromobilität wird die Nachfrage bis 2030 voraussichtlich maximal doppelt so hoch sein. Der größte Teil des Nickelverbrauchs entfällt jedoch auf andere Anwendungen. In einem Szenario mit hoher Nachfrage könnte der Nickelbedarf jedoch auf das Dreißigfache des aktuellen Bedarfs steigen. [23, S.31f.]

In Anbetracht der potenziell enorm steigenden Nachfrage nach Nickel, lässt sich auch die zunehmende Nachfrage nach anderen wichtigen Rohstoffen wie Graphit nicht unbeachtet lassen. Abbildung 8 zeigt die Nachfrage an Graphit für den Bereich der E-Mobilität. Laut dem Umweltbundesamt werden in der Europäischen Union jährlich etwa 250.000 Tonnen benötigt. Ein großer Teil davon wird als Anodenmaterial in Batterien verwendet. Graphit kommt jedoch auch in anderen Bereichen zum Einsatz, wie beispielsweise in der Elektrostahlherstellung [23, S.29]. Zudem kann man der Abbildung 8 entnehmen, dass

bis 2050 der Bedarf an Graphit, aufgrund des Wachstums der Elektromobilität, um das Zehnfache steigen könnte. Darüber hinaus wird für andere Anwendungen mehr als das Vierfache des Verbrauchs benötigt. Der Hauptbedarf entsteht vor allem durch Lithium-Ionen-Akkus. [23, S.30] Im Jahre 2018 entfielen fast 14% des Graphitverbrauches auf Akkus und Batterien, wobei 90% des Anteils in Lithium-Ionen-Akkus verwendet wurden [23, S.30].

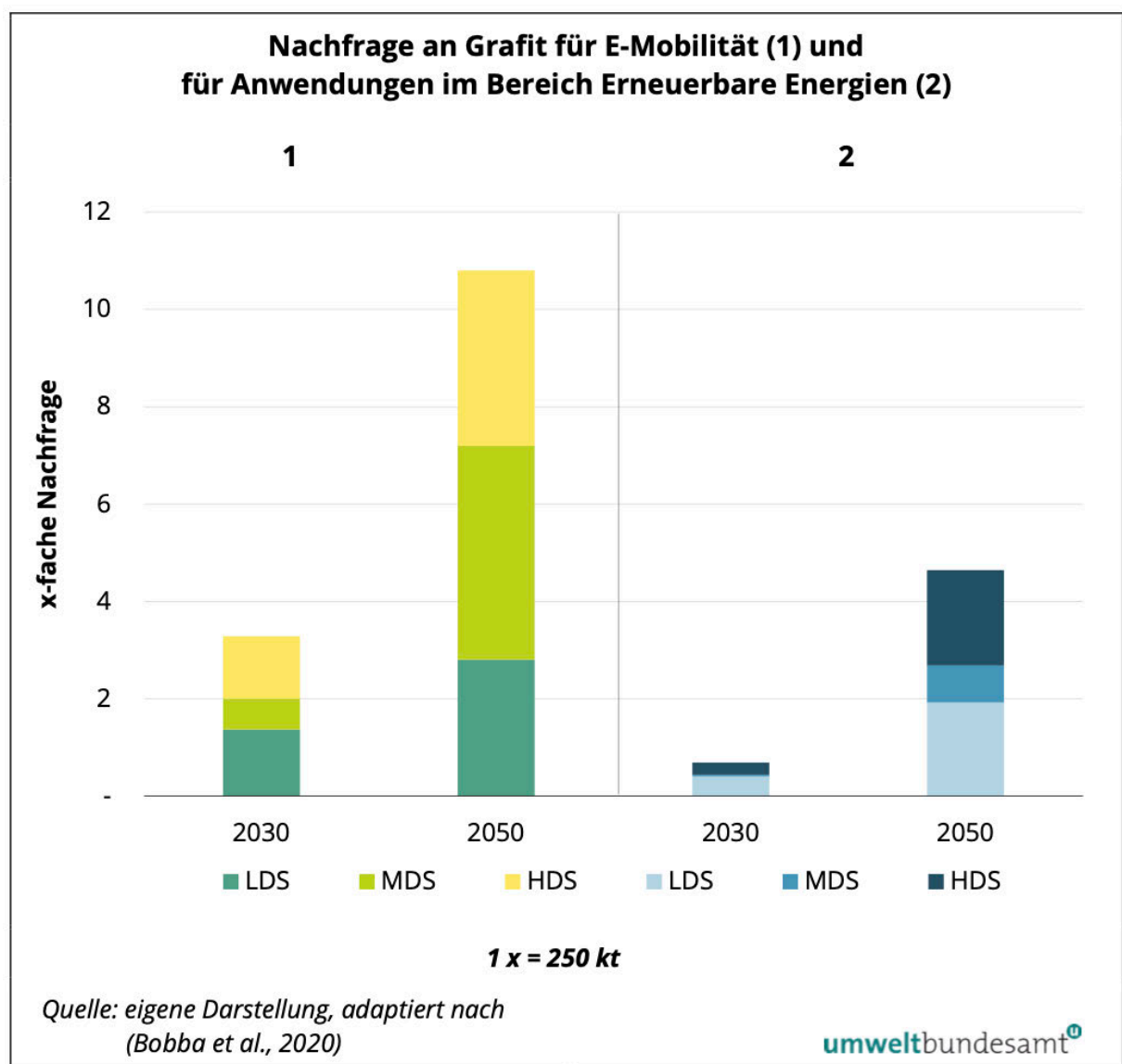


Abbildung 8: Nachfrage an Grafit für E-Mobilität (1) und für Anwendungen im Bereich Erneuerbare Energien (2) [23, S.30]

Die Auswirkungen der Rohstoffgewinnung und der Batteriefertigung auf die Umwelt lassen sich anhand der Treibhausgasemissionen, dem Wasserverbrauch und den regionalen Unterschieden bewerten, die eine Grundlage für die weitere Analyse bilden.

Betrachtet man die Batteriefertigung in der Europäischen Union wird deutlich, dass die Produktion von Batteriezellen energieintensiv ist. Der Abbildung 9 ist zu entnehmen, dass die Batterie rund 83% der Emissionen bei der Produktion des E-Auto-Antriebsstrangs ausmacht [31].

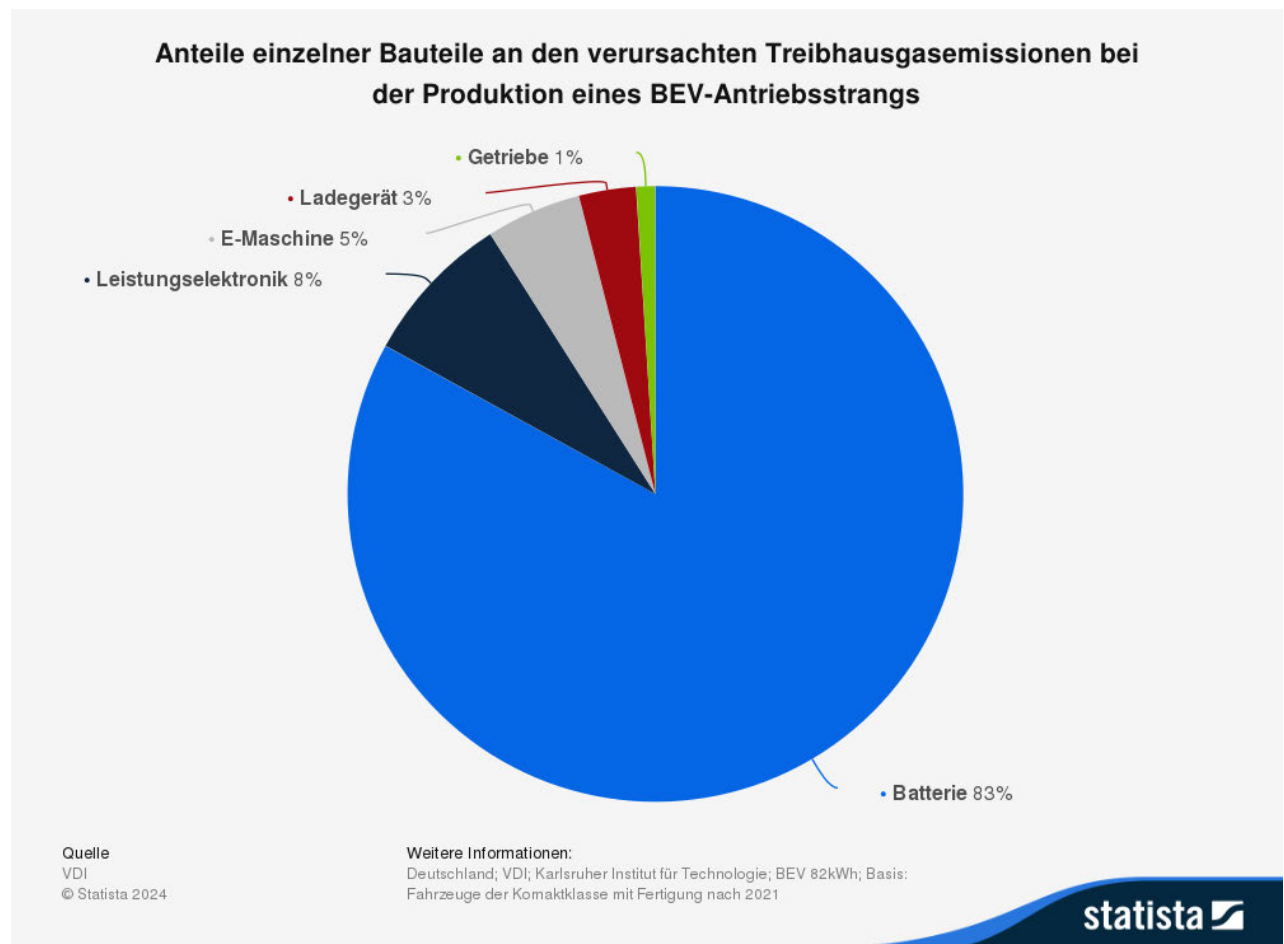


Abbildung 9: Anteile einzelner Bauteile an den verursachten Treibhausgasemissionen bei der Produktion eines BEV-Antriebsstrangs [31]

Die Umweltbilanz von batteriebetriebenen Fahrzeugen hängt stark vom genutzten Strommix ab. In der Europäischen Union wurden 2023 etwa 43% des Stroms aus erneuerbaren Quellen erzeugt [32]. Je höher dieser Anteil ist, desto klimafreundlicher sind BEVs im Vergleich konventionellen Fahrzeugen.

Derzeit verursacht die Batteriefertigung in der EU Emissionen von 80 kg CO₂-Äquivalente pro kWh-Kapazität, selbst wenn anteilig erneuerbare Energien genutzt werden [33]. Der CO₂-Fußabdruck kann jedoch deutlich reduziert werden, wenn der Anteil an erneuerbaren und sauberen Energiequellen weiter erhöht wird. Laut Abbildung 10 lag

dieser Wert nach Northvolt bei Northvolt-Batteriezellen im Jahre 2023 bei nur 33 kg CO₂-Äquivalente pro kWh [34], was das Potenzial für eine Reduktion verdeutlicht.

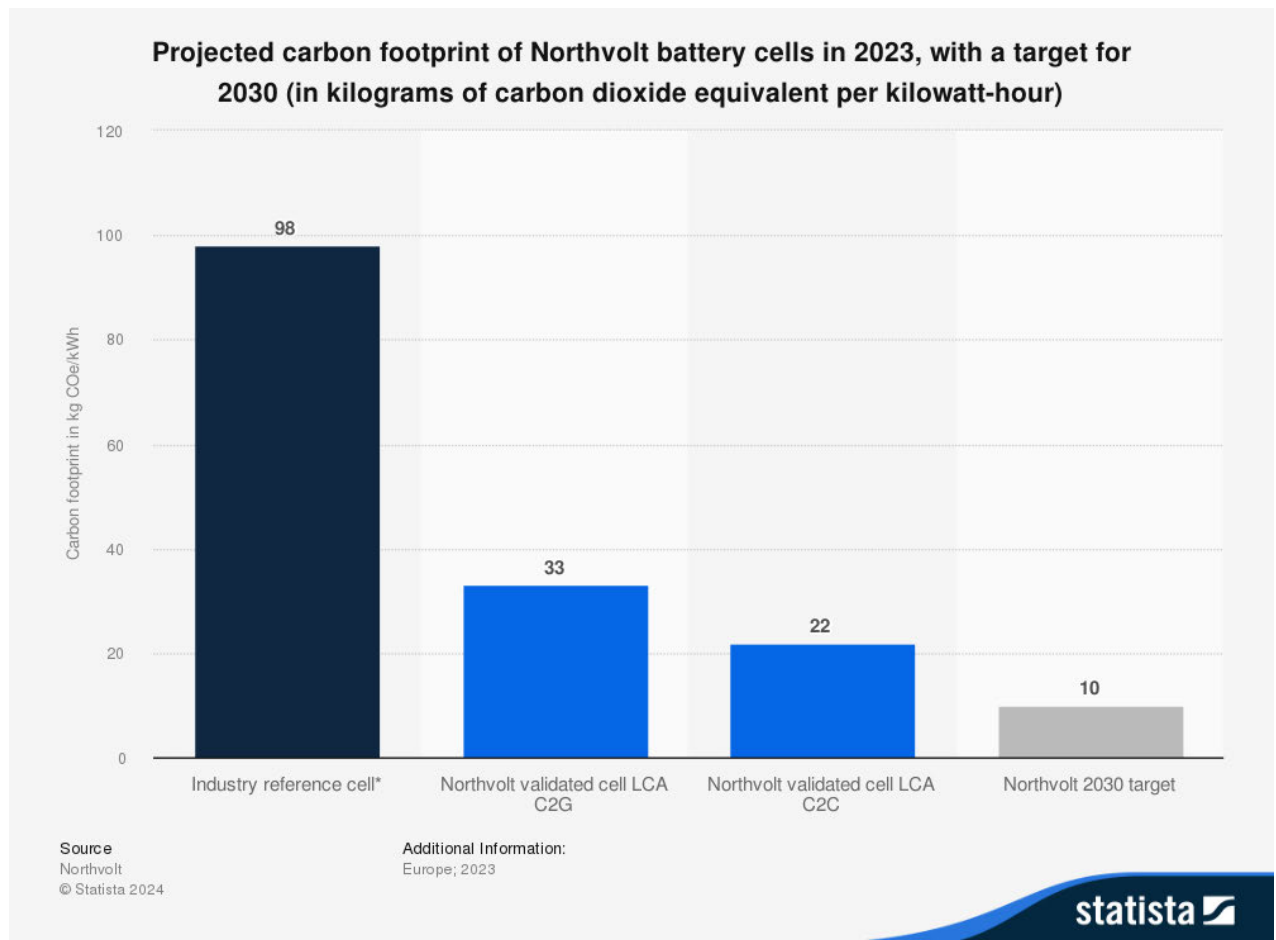


Abbildung 10: Projected carbon footprint of Northvolt battery cells in 2023, with a target for 2030 [34]

In Regionen mit einem hohen Anteil fossiler Energien können Emissionen jedoch auf über 150 kg CO₂-Äquivalente pro kWh [35]. Dies liegt vor allem daran, dass der Energieverbrauch in der Produktion von Batterien sehr hoch ist und fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl oder Gas einen deutlich höheren CO₂-Ausstoß pro erzeugter Energieeinheit haben als erneuerbare Energien.

Es kann festgehalten werden, dass die Batteriefertigung eine umfangreiche Energie erfordert, insbesondere bei der Herstellung von Batteriezellen. In Regionen, in denen die Stromversorgung überwiegend auf fossilen Brennstoffen basiert, entsteht eine größere Menge an CO₂-Emissionen. Das bedeutet, dass die Umweltbilanz von Batterien in diesen Regionen ungünstiger ausfällt, was sich wiederum negativ auf die Klimabilanz von

batteriebetriebenen Fahrzeugen auswirkt, die in den jeweiligen Regionen produziert werden. In Regionen mit einem höheren Anteil erneuerbaren Energien ist der CO₂-Ausstoß pro kWh wesentlich geringer, da der Strommix sauber ist und ein großer Anteil aus Wind, Wasser und Solarenergie bezieht, die nahezu keine CO₂-Emissionen verursachen. Dies hat zur Folge, dass die Batteriefertigung in diesen Regionen eine deutlich bessere CO₂-Bilanz aufweist.

Bezogen auf den Wasserverbrauch kann gesagt werden, dass der besonders kritisch bei der Lithiumextraktion in Salzseen ist. Die Lithiumproduktion im Lithium Dreieck (Chile, Bolivien, Argentinien) erfolgt durch die Verdunstung von Salzwasser in niederschlagsarmen Gebieten. Dies senkt den Grundwasserspiegel, trocknet Flüsse und Feuchtgebiete aus, schädigt Ökosysteme und führt zu Wassermangel. Die Auswirkungen sind somit sowohl ökologisch als auch sozial erheblich schädigend [23, S.41].

4.1.2 Nutzung und Energiemix

Nach der Betrachtung der Rohstoffgewinnung und der Batteriefertigung richtet sich der Fokus der Lebenszyklusanalyse auf die Nutzung und den Energiemix. Die beiden Kriterien spielen eine entscheidende Rolle bezüglich der Umweltbilanz batteriebetriebener Fahrzeuge.

Das Ziel der Analyse ist es, die Umweltbelastungen während der Nutzungsphase zu bewerten. Der Fokus liegt hierbei auf den CO₂-Emissionen, die durch den Energiemix unterschiedlicher europäischer Länder entstehen und deren Einfluss auf die Klimabilanz aufzeigen.

Die Sachbilanz erfasst die Eingaben und Ausgaben in der Nutzungsphase. Hier werden die CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung und dem Energieverbrauch eines BEVs berechnet. In Abbildung 11 ist der CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde Strom in Deutschland dargestellt. Dieser Wert lag 2023 bei etwa 380g CO₂ / kWh, aufgrund eines hohen Anteils fossiler Energie im Energiemix [24]. Die Abbildung zeigt ebenfalls auch den CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde Strom in Frankreich. Im Vergleich dazu betrug dieser im Jahre 2023 nur 56g CO₂ / kWh, da der Strommix größtenteils aus Kernenergie besteht. [25]

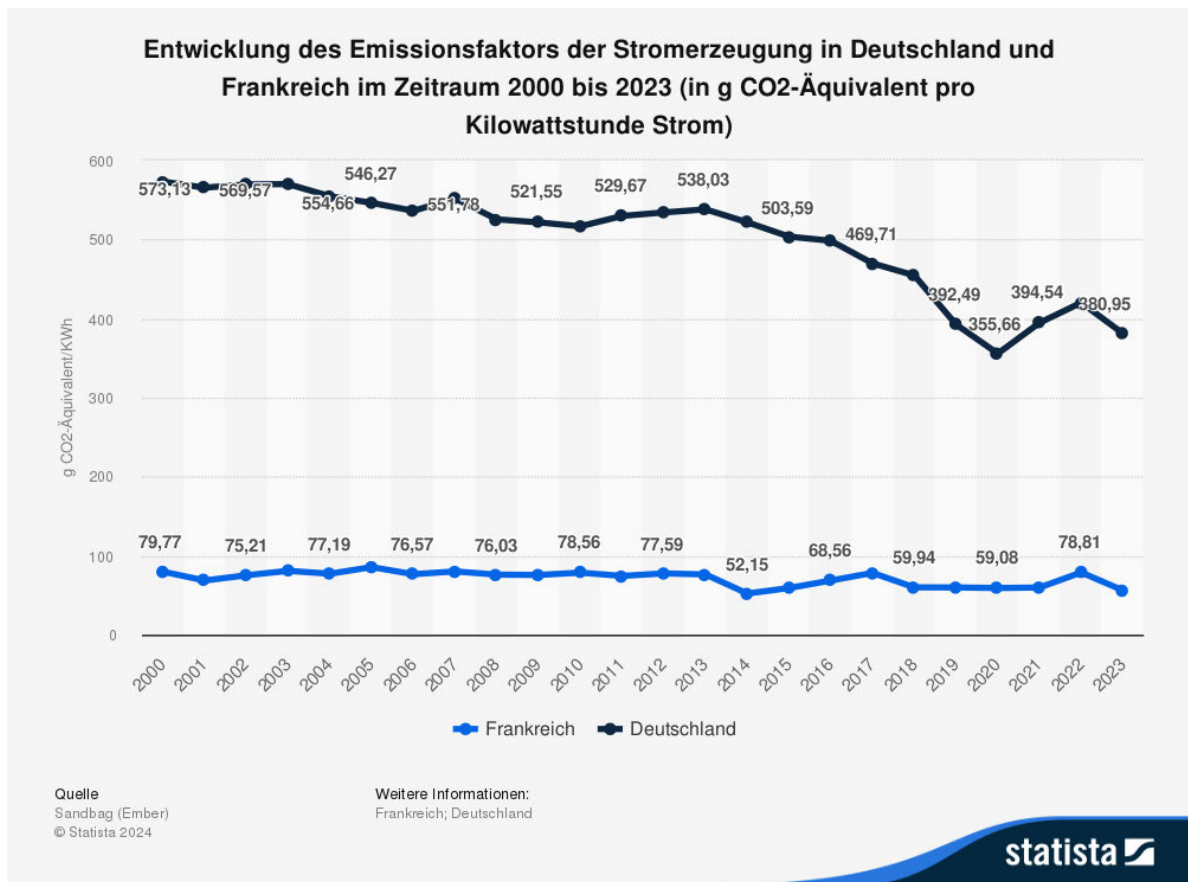


Abbildung 11: Entwicklung des Emissionsfaktors der Stromerzeugung in Deutschland und Frankreich im Zeitraum 2000 bis 2023 [25]

Neben Deutschland und Frankreich lassen sich auch Norwegen und Polen als interessante Beispiele für den Energiemix und dessen Einfluss auf die Klimabilanz von BEVs heranziehen. Obwohl Norwegen kein Mitglied der Europäischen Union ist, erscheint es sinnvoll, das Land mit in die Analyse einzubeziehen, da es weltweit den niedrigsten Emissionsfaktor in der Stromerzeugung aufweist. Dies ermöglicht einen interessanten Vergleich und verdeutlicht das Potenzial einer sauberen Stromerzeugung sowie deren Einfluss auf die CO₂-Bilanz von BEVs. Norwegen erzeugt zu 99% seines Stroms aus erneuerbaren Energien, hauptsächlich aus Wasserkraft [27]. Die Abbildung 12 zeigt, dass der CO₂-Ausstoß bei 30,05 CO₂ / kWh liegt, was einen der niedrigsten Werte weltweit darstellt. Somit haben die BEVs in Norwegen eine fast emissionsfreie Nutzungsphase, da der Strom nahezu vollständig klimaneutral erzeugt wird.

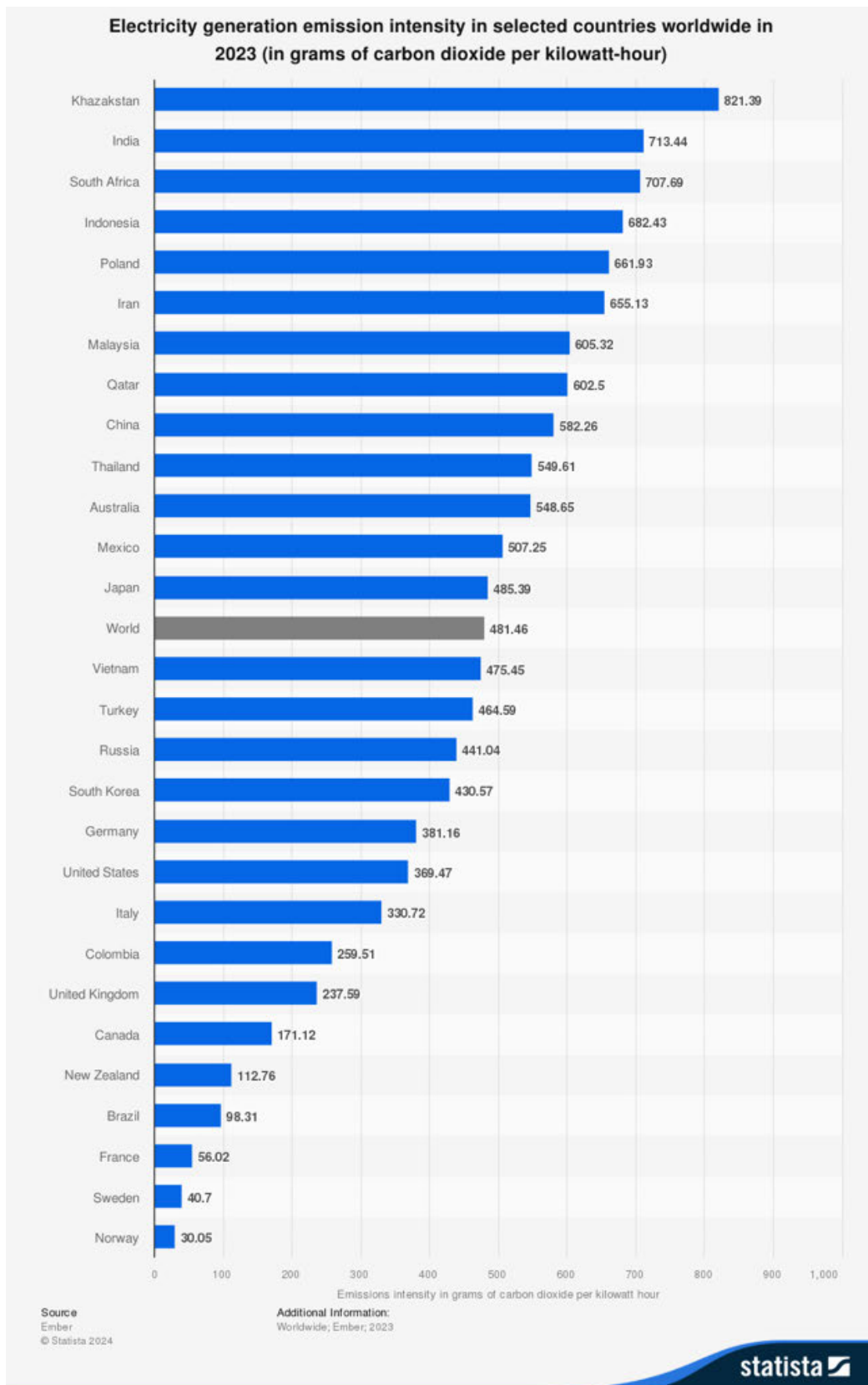


Abbildung 12: Electricity generation emission intensity in selected countries worldwide in 2023 [28]

Im Gegensatz dazu zeigt sich in Polen ein anderes Bild: Während Norwegen auf eine nahezu emissionsfreie Stromerzeugung setzt, stammte der Strom in Polen im Jahre 2023 überwiegend aus fossilen Brennstoffen, wobei 61,05% des Stroms aus Kohle stammte [29]. Der Energiemix wird somit stark von fossilen Brennstoffen dominiert. Betrachtet man den CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde Strom lag der Wert im Jahre 2023 bei 661,93g CO₂ / kWh [28]. Damit weist Polen den höchsten Emissionswert unter den mittel- und osteuropäischen Ländern auf. [30]

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass der Energiemix die indirekten Emissionen während der Nutzung stark beeinflusst. Länder mit fossilem Energiemix – wie Deutschland und Polen – weisen deutlich höhere CO₂-Werte auf, während Länder mit erneuerbaren oder kernkraftbasierten Stromquellen – wie Norwegen und Frankreich – eine bessere Klimabilanz erreichen.

Die Klimabilanz von batteriebetriebenen Fahrzeugen ist somit stark vom regionalen Strommix abhängig. BEVs profitieren vor allem in Ländern, die eine emissionsarme Stromerzeugung aufweisen. In Ländern, die hauptsächlich fossile Energien nutzen, ist die Klimabilanz deutlich schlechter, bleibt jedoch häufig immer noch besser als die von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Um das Potenzial von BEVs zur Emissionsreduktion jedoch vollständig auszuschöpfen, ist eine konsequente Dekarbonisierung des Stromsektors notwendig.

4.1.3 Recyclingstrategien und Rohstoffkreisläufe

In diesem Kapitel wird analysiert wie Recyclingstrategien den Ressourcenverbrauch und die Emissionen während der einzelnen Phasen des Lebenszyklus reduzieren können. Die Untersuchung erfolgt unter Berücksichtigung der Vorgaben der Europäischen Union zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft.

Besonders im Fokus steht, wie die Kreislaufwirtschaft durch effiziente Recyclingmethoden und geschlossene Rohstoffkreisläufe für BEVs optimiert werden kann. Die Analyse zielt darauf ab, die Auswirkungen des Batterierecyclings auf den gesamten Lebenszyklus von BEVs zu quantifizieren, einschließlich der Reduzierung von CO₂-Emissionen, des Ressourcenverbrauchs und der Abfallproduktion.

BEVs erfordern eine Vielzahl von Rohstoffen, insbesondere für die Produktion von Batterien. Diese Rohstoffe müssen entweder aus Primärquellen oder durch das Recycling gewonnen werden. Die Rohstoffgewinnung wirkt sich somit erheblich auf die Umwelt aus, und dass sowohl durch den Energieverbrauch als auch durch Umweltschäden wie Bodenzerstörung, Wasserverbrauch und Emissionen [23, S.40f].

Wie bereits oben erwähnt ist Lithium das Hauptmetall für die BEV-Batterien und somit ein essenzieller Bestandteil. Laut der Europäischen Rohstoffstrategie 2023 wurde Lithium jedoch als kritischer Rohstoff eingestuft. Problematisch ist, dass die Nachfrage nach Lithium stetig steigt, was wiederum zu einer verstärkten Exploration und Förderung des Rohstoffes führt [37, S.22f.]. Die europäische Rohstoffstrategie zielt darauf ab, die Versorgung der EU mit wichtigen Rohstoffen zu sichern, die für industrielle Prozesse und technologische Entwicklungen unerlässlich sind. Ein zentraler Bestandteil dieser Strategie ist die Identifizierung und Klassifizierung sogenannter Materialien, die für die Wirtschaft der EU von hoher Bedeutung sind, jedoch gleichzeitig mit einem hohen Versorgungsrisiko verbunden sind [38]. Die EU hat Maßnahmen ergriffen, um die Versorgung mit solchen Rohstoffen zu sichern und die Abhängigkeit von Importen zu reduzieren. Dazu gehört die Förderung von Recycling, die Ausweitung der Lieferquellen und die Entwicklung von Ersatzstoffen. Neben Lithium werden ebenfalls Kobalt und Nickel in großen Mengen für Lithium-Ionen-Batterien benötigt. Ein erheblicher Teil des Kobalts wird aus dem Kongo abgebaut, wo Arbeits- und Umweltbedingungen problematisch sind. [37, S.26] Auch der Nickelabbau führt zu landwirtschaftlicher Degradierung und Wasserverschmutzung [39, S.6].

Ein zentraler Aspekt, der im weiteren Verlauf betrachtet wird, ist die Batterieherstellung, die aufgrund ihres hohen Energiebedarfs einen erheblichen Einfluss auf die CO₂-Bilanz hat. Die Produktion erfordert große Mengen an Energie. Diese Energie stammt oft aus fossilen Quellen, was zu hohen CO₂-Emissionen führt. Die EU verfolgt jedoch eine umfassende Strategie zur Reduzierung von CO₂-Emissionen durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien und die Steigerung der Energieeffizienz.

Ein zentrales Element dieser Strategie ist das Programm „Fit für 55“, das darauf abzielt, die Netto-Treibhausgasemissionen in der EU bis 2030, um mindestens 55% im Vergleich zu 1990 zu senken. [40] Im Rahmen dieses Programms werden verschiedene

Maßnahmen ergriffen, um den Anteil erneuerbarer Energien zu erhöhen und die Energieeffizienz zu verbessern. Dazu gehört unter anderem die Förderung von Investitionen in saubere Energiequellen, die Verbesserung der Energieeffizienzstandards und die Unterstützung von Innovationen im Energiebereich. [41]

Diese Initiativen sind Teil des umfassenden Europäischen Grünen Deals, der darauf abzielt, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen. Durch die Umsetzung dieser Strategien strebt die EU an, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern und den Übergang zu einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Wirtschaft zu fördern [41]

Die Ergebnisse zeigen, dass die Produktion von BEV-Batterien erheblich zu den gesamten CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs beiträgt. Recyclingmethoden können jedoch die Emissionen verringern, indem Primärrohstoffe extrahiert werden, was dazu führt, dass ein großer Teil der CO₂-Emissionen in der Rohstoffbeschaffung reduziert wird.

Ein weiterer bedeutender Schwerpunkt liegt auf der Entsorgung der Altbatterien am Ende ihres Lebenszyklus. Dies stellt nicht nur eine Herausforderung, sondern auch eine Chance dar, die Umweltschäden zu minimieren und wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen. Unzureichendes Recycling von Batterien führt nämlich zu Umweltschäden und wertvolle Rohstoffe gehen verloren. Ein ineffizienter Umgang mit Abfällen und eine geringe Recyclingquote können somit zu erheblichen Umweltproblemen führen. Laut einer Studie des Frankfurter ISI wird bis 2025 eine Rückgewinnungseffizienz von 65% und bis 2030 von 70% angestrebt. Für Kobalt und Kupfer soll die Vorgabe von 80% in 2025 auf 95% in 2030 ansteigen [42, S.12].

Nun wird betrachtet, wie sich die eingesetzten Rohstoffe, der Energieverbrauch und die Recyclingmethoden auf verschiedenen Umweltfaktoren wie den Klimawandel, die Ressourcennutzung, die Verschmutzung und die Gesundheitsrisiken auswirken.

Wie zuvor beschrieben, ist die Herstellung eines BEVs sehr CO₂ intensiv, insbesondere aufgrund der Batterieproduktion. Laut den Berechnungen der schwedischen Studie¹,

¹ Die Schweden-Studie hat im Mai 2017 die gesamten CO₂-Emissionen bei der Herstellung eines Lithium-Ionen-Akkus vom Abbau der Rohstoffe bis zum Einbau in das Getriebe eines Elektrofahrzeugs mithilfe der Lebenszyklusanalyse untersucht. Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den Akku. [43].

verursacht die Produktion einer Lithium-Ionen-Batterie CO₂-Emissionen in Höhe von 150 bis 200 kg pro kWh, was insgesamt zu rund 9000 kg CO₂ für eine einzelne 60 kWh Batterie führt [43]. Ein effektives Recycling reduziert diesen CO₂-Ausstoß, da weniger Primärrohstoffe benötigt werden. Die 2019 aktualisierte Studie des schwedischen Instituts IVL zeigt, dass Fortschritte in der Batterietechnologie, bessere Recyclingstandards und ein nachhaltiger Strommix den CO₂-Ausstoß bei der Batterieproduktion deutlich gesenkt haben. Demnach verursacht die Herstellung von Batterien je Kilowattstunde nur noch 61-106 kg statt 150-200 kg CO₂ pro kWh. An dieser Stelle ist wichtig zu erwähnen, dass kein genauerer Wert ermittelt werden konnte, da die Hersteller bei der Produktion der Batterie erneuerbaren Strom in unterschiedlichem Umfang nutzten [44]. Das bedeutet, dass die Hersteller erneuerbaren Strom nicht alle in gleichem Maße verwendeten. Einigen setzten stark auf erneuerbare Energien, andere nur teilweise oder in geringem Maße. Der Anteil an grünem Strom variiert also von Hersteller zu Hersteller.

Bezogen auf den Ressourcenverbrauch im Lebenszyklus von BEVs wird durch den Abbau und die Verarbeitung von Rohstoffen wie Lithium, Kobalt und Nickel stark beeinflusst. Das Recycling dieser Rohstoffe kann dazu beitragen, die Nachfrage nach Primärrohstoffen zu verringern und den Gesamtverbrauch zu senken. Die EU hat in ihrer RAW Material Initiative² betont, dass Recyclingtechnologien entscheidend sind, um die Abhängigkeit von Importen kritischer Rohstoffe zu verringern [45].

Die Lebenszyklusanalyse zeigt, dass Recyclingmethoden eine wichtige Rolle bei der Minimierung der Umweltauswirkungen von BEVs spielen können. Derzeit sind die Recyclingquoten jedoch noch unzureichend. Eine höhere Effizienz beim Recycling von Lithium, Kobalt und Nickel könnte den Bedarf an Primärrohstoffen signifikant senken und die CO₂-Emissionen der BEVs verringern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Recyclingmethoden und Rohstoffkreisläufe für BEVs eine zentrale Rolle bei der Reduzierung von CO₂-Emissionen und

² Die Raw Materials Initiative ist eine Strategie der EU zur Sicherung einer nachhaltigen und wettbewerbsfähigen Versorgung mit wichtigen Rohstoffen. Sie zielt darauf ab, die Abhängigkeit von Importen zu reduzieren, Recycling zu fördern und alternative Bezugsquellen zu erschließen [46]

Ressourcennutzung spielen. Die EU hat bereits Maßnahmen ergriffen, um das Recycling von Batterien zu fördern. In Zukunft könnte eine weitere Integration von Closed-Loop-Recycling-Systemen, bei denen die gleichen Materialien immer wieder verwendet werden, zu einer deutlich nachhaltigeren Produktion führen. Durch die Verbesserung von Recyclingtechnologien und die Umsetzung politischer Maßnahmen kann die Umweltauswirkung der BEV-Produktion erheblich verringert werden.

4.2 Verbrennungsmotorfahrzeuge

Der Lebenszyklus von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren umfasst mehrere zentrale Phasen, die ihre Umweltbilanz prägen. Dazu zählen die Rohstoffgewinnung und Fahrzeugproduktion, die Nutzung sowie das Ende des Lebenszyklus mit Recyclingstrategien und der Schließung von Rohstoffkreisläufen.

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus detailliert analysiert, wobei der Schwerpunkt auf den folgenden Aspekten liegt: die ökologischen Herausforderungen bei der Rohstoffgewinnung und der Fahrzeugproduktion, die Emissionen während der Nutzung sowie die Möglichkeiten und Grenzen von Recyclingstrategien und geschlossenen Rohstoffkreisläufen. Ziel ist es, die wesentlichen Einflussfaktoren auf Umweltbilanz von ICEV zu identifizieren und Handlungsansätze für eine nachhaltigere Nutzung und Entsorgung dieser Fahrzeuge aufzuzeigen.

4.2.1 Rohstoffgewinnung und Fahrzeugproduktion

Die Lebenszyklusanalyse eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor in der EU berücksichtigt in erster Linie die Phasen der Rohstoffgewinnung und Fahrzeugproduktion, die erheblichen Auswirkungen auf die Umwelt und den Ressourcenverbrauch haben. Die Rohstoffgewinnung ist der erste Schritt in der Fahrzeugproduktion und umfasst die Beschaffung der Materialien, die für die Herstellung von ICEVs benötigt werden. Dazu gehören Stahl, Aluminium, Kunststoffe und Edelmetalle wie Platin und Palladium, die in Katalysatoren verwendet werden. [47]

Die Stahl- und Aluminiumproduktion sind entscheidende Schritte in der Fahrzeugherstellung, da diese Materialien für die Karosserie und Fahrzeugstruktur erforderlich sind. Die Stahlindustrie ist ein bedeutender Verursacher von CO₂-Emissionen

in der EU. In Deutschland, einem der größten Stahlproduzenten Europas, liegt ihr Anteil bei etwa 2,5% der gesamten Emissionen [48]. Allein ThyssenKrupp Steel war 2022 mit rund 16,2 Millionen CO₂-Emissionen maßgeblich daran beteiligt [48]. Die AG setzt verstärkt auf „grünen Stahl“ und plant mit seinem Geschäftsbereich Decarbon Technologies Kohle durch grünen Wasserstoff zu ersetzen. Mithilfe von Direktreduktionsanlagen soll bei der Stahlherstellung künftig statt CO₂ nur Wasserdampf entstehen. Dafür ist jedoch der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur sowie der erneuerbaren Energien in Europa notwendig. [48] Die Umstellung auf grünen Stahl ermöglicht eine drastische Reduktion der CO₂-Emissionen und könnte ThyssenKrupp eine Vorreiterrolle in der klimaneutralen Stahlproduktion verschaffen. Dies setzt jedoch den Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur und erneuerbarer Energien voraus, um den steigenden Energiebedarf der neuen Technologie zu decken. [48]

Nicht nur die Stahlproduktion, sondern auch die Herstellung von Aluminium ist ebenfalls energieintensiv und verursacht hohe CO₂-Emissionen. Im Jahre 2021 emittierte der Elektrolyseprozess bei der Produktion von Aluminium weltweit 863 Millionen Tonnen CO₂. [49] Das stellt eine enorme Menge dar und trägt erheblich zu den globalen Treibhausgasemissionen bei.

Betrachtet man nun die Rolle der Edelmetalle, wird deutlich, dass sie einen starken Beitrag zur Reduktion von Schadstoffemissionen leisten. Die Edelmetalle, insbesondere Platin und Palladium, werden für die Abgasreinigungssysteme von Fahrzeugen verwendet. In Abbildung 13 ist deutlich zu sehen, dass im Jahre 2022 79% der globalen Palladiumnachfrage von der Automobilindustrie für den Einsatz von Katalysatoren verwendet wurde. [50] Die Verwendung von Edelmetallen wie Platin, Palladium und Rhodium in Katalysatoren für Fahrzeugabgasreinigungssysteme hat einen erheblichen Einfluss auf die Reduktion von Schadstoffemissionen. Diese Edelmetalle wirken als Katalysatoren, die chemische Reaktionen fördern, um schädliche Abgase in weniger schädliche Substanzen wie Kohlendioxid und Wasserdampf umzuwandeln. Katalysatoren können somit dazu beitragen, die Freisetzung von Schadstoffen, um bis zu 90% zu reduzieren. Die Verbesserung der Luftqualität ist insbesondere in städtischen Gebieten, in denen der Verkehr einen großen Anteil an der Luftverschmutzung hat, besonders wichtig [51, S.3].

Die 79% der globalen Palladiumnachfrage unterstreicht somit die zentrale Rolle dieses Edelmetalls in der Emissionsminderung durch Fahrzeuge. Dies zeigt ebenfalls, wie entscheidend der Einsatz von Palladium für die Verringerung der Umweltbelastung durch den Verkehr ist.

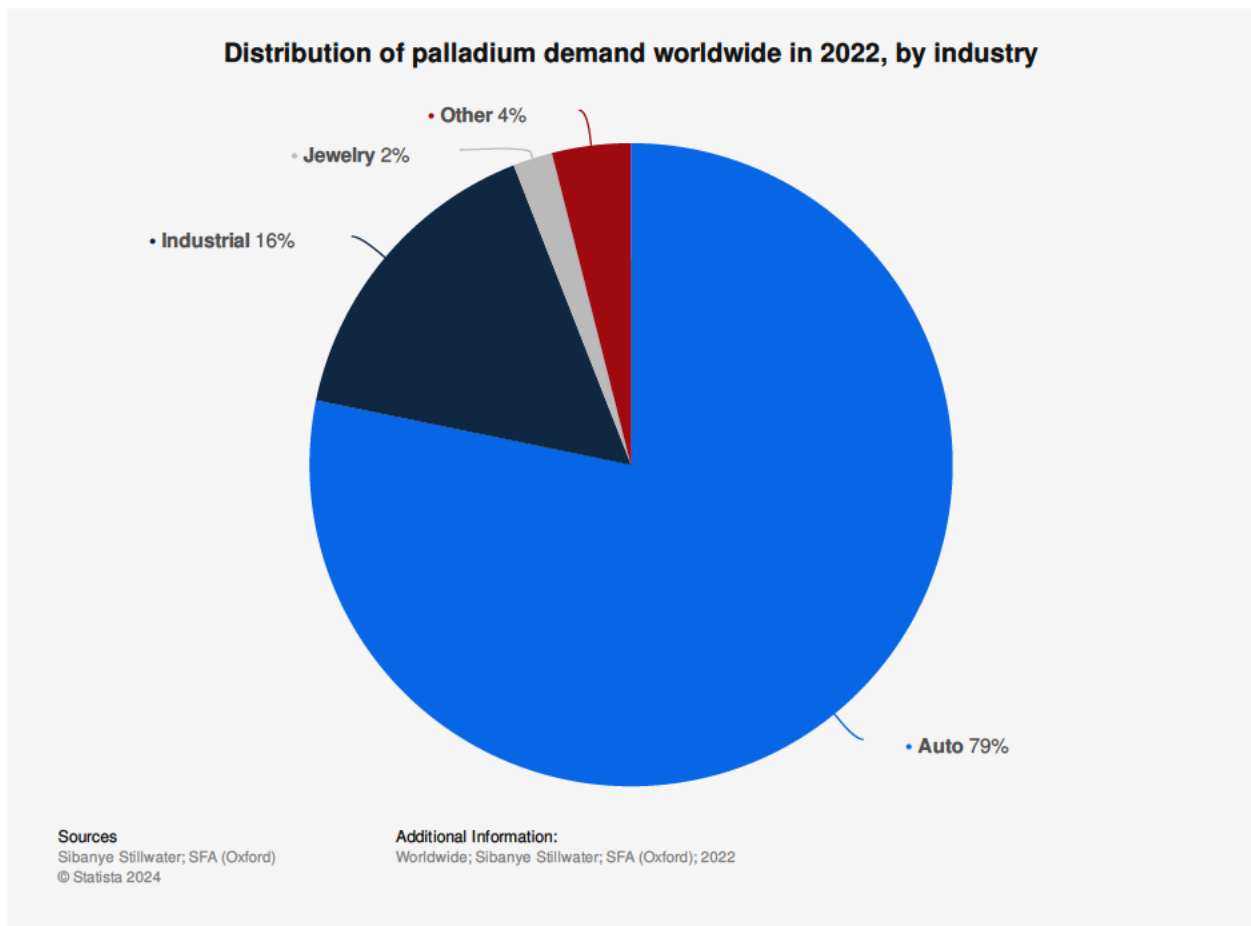


Abbildung 13: Distribution of Palladium demand worldwide in 2022 [50]

Neben den klassischen Materialien und den Edelmetallen spielt auch der Abbau von seltenen Erden und anderen weiteren kritischen Rohstoffen eine Rolle, insbesondere in elektronischen Komponenten und der Fahrzeugsteuerung. Die EU verfolgt daher eine Strategie zur Reduzierung der Umweltbelastungen, die durch den Abbau und die Verarbeitung dieser Rohstoffe entstehen. Dies erfolgt durch die verstärkte Recyclingmaßnahmen und den Fokus auf eine nachhaltigere Nutzung von Ressourcen, welches im nachfolgenden Kapitel näher beleuchtet wird.

Die Fahrzeugproduktion selbst ist ein energieintensiver Prozess. Der Energieverbrauch bei der Herstellung eines ICEVs ist hoch, da die Herstellung von Metallen wie Stahl und

Aluminium viel Energie erfordert. Laut IEA verursacht ein durchschnittlicher Verbrenner etwa 10 Tonnen CO₂-Äquivalente während der Fahrzeugproduktion [52]. Dieser Wert kann jedoch variieren, abhängig von der Art der Produktion und den verwendeten Materialien.

Trotz der Fortschritte in der Reduktion von CO₂-Emissionen und der Steigerung der Recyclingquoten bleibt die Fahrzeugproduktion eine der umweltschädlichsten Phasen im Lebenszyklus eines ICEVs. Der Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen müssen weiterhin gesenkt werden, um die Umweltauswirkungen zu minimieren. Auch die Materialverschwendung bleibt eine Herausforderung, da immer noch eine erhebliche Menge an Abfall entsteht, die effizienter recycelt werden könnte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rohstoffgewinnung und Fahrzeugproduktion von ICEVs wichtige Phasen sind, die sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die Umwelt und den Ressourcenverbrauch innerhalb der EU haben. Die EU hat bereits Maßnahmen ergriffen, um durch Recycling und CO₂-Reduktionsvorgaben die Umweltauswirkungen zu verringern, doch es bleibt eine große Herausforderung, den Ressourcenverbrauch und die CO₂-Emissionen weiter zu senken. Der Europäische Grüne Deal und die Strategie für eine Kreislaufwirtschaft bieten wichtige Ansätze, um die Ressourceneffizienz zu steigern und den Ressourcenverbrauch nachhaltig zu gestalten. Diese Aspekte werden im darauffolgenden Kapitel analysiert und dargestellt.

4.2.2 Nutzung und Emissionen

Die Nutzungsphase bei ICEVs ist die bedeutendste Phase in Bezug auf die Umweltbelastung, insbesondere durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe. Die dabei entstehenden CO₂-Emissionen sowie Schadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub tragen erheblich zum Klimawandel und zur Luftverschmutzung bei. Der Kraftstoffverbrauch, die Fahrleistung und das individuelle Fahrverhalten beeinflussen die Gesamtemissionen. Trotz technologischer Fortschritte bei Motoren und Abgasnachbehandlungssystemen bleibt die Nutzung von ICEVs eine der Hauptquellen für Treibhausgase und Luftschadstoffe im Verkehrssektor.

Im Rahmen der Lebenszyklusanalyse wird die Umweltbelastung der Nutzungsphase analysiert, wobei insbesondere die Höhe der CO₂-Emissionen und Luftschadstoffe eines typischen ICEV über seine gesamte Lebensdauer und die Effizienz der Abgasnachbehandlungssysteme eine entscheidende Rolle.

Im Rahmen der Sachbilanz wird die Nutzungsphase von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren untersucht, wobei die Systemgrenze auf die Verbrennung fossiler Kraftstoffe im Fahrzeug beschränkt ist. Die Analyse berücksichtigt sowohl den Verbrauch von Diesel und Benzin als auch die dabei entstehenden Emissionen.

Abbildung 14 zeigt den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch neu zugelassener PKWs von 2013 bis 2023. Dem Kraftfahrt-Bundesamt zufolge weist ein typisches Fahrzeug mit Verbrennungsmotor einen durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von 6,2 Litern Diesel pro 100 Kilometer und 6,4 Liter Benzin pro 100 Kilometer auf [53]. Über eine angenommene Lebensdauer von 200.000 Kilometer [54] ergibt sich ein Gesamtkraftstoffverbrauch von 12.800 Liter für Benzinerfahrzeuge und 12.400 Liter für Dieselfahrzeuge. Der tatsächliche Kraftstoffverbrauch kann je nach Fahrzeugtyp, Fahrstil und weiteren Einflussfaktoren erheblich variieren. So haben SUVs und Oberklassefahrzeuge in der Regel einen deutlich höheren Verbrauch im Vergleich zu Kleinwagen [55].

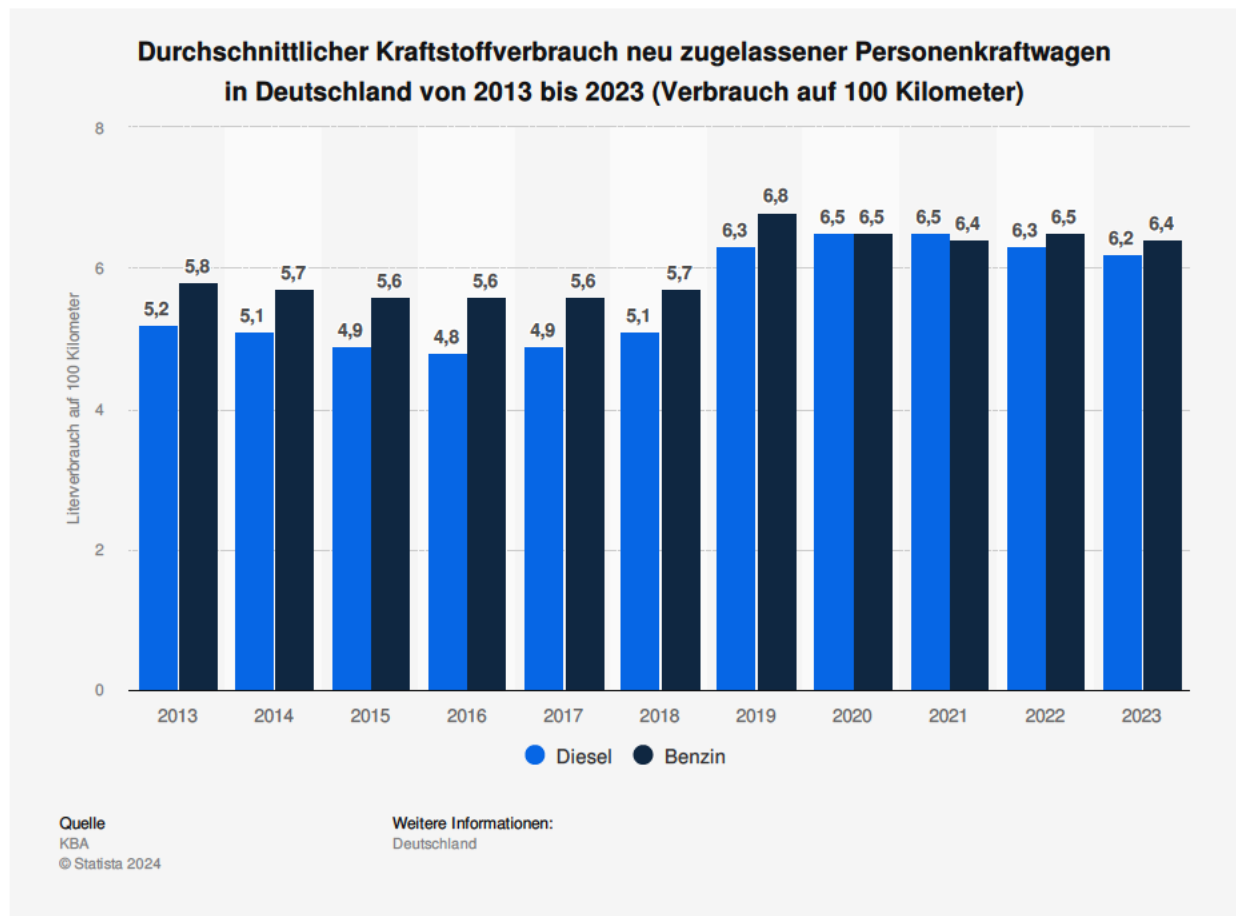


Abbildung 14: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland von 2013 bis 2023 (Verbrauch auf 100 Kilometer) [53]

Die entsprechenden Emissionen werden auf Basis der spezifischen Emissionsfaktoren berechnet. Für Diesel ergibt sich ein Emissionsfaktor von 2,65 Kilogramm CO₂ pro Liter Kraftstoff, während Benzin mit 2,37 Kilogramm CO₂ pro Liter etwas niedriger liegt [56, S.9]. Auf die gesamte Lebensdauer hochgerechnet, entstehen durch Dieselmotorbetrieb etwa 32.860 kg CO₂ ($200.000 \text{ km} \times \left(\frac{6,2 \text{ l}}{100 \text{ km}} \right) \times 2,65 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{l}}$), während ein Benzinfahrzeug etwa 30.336 kg CO₂ ($200.000 \text{ km} \times \left(\frac{6,4 \text{ l}}{100 \text{ km}} \right) \times 2,37 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{l}}$) produziert. Um die Emissionen zu berechnen, wird in der vorliegenden Arbeit die Formel 1 benutzt:

$$\text{Emission} = \text{Kilometer} \times \left(\frac{\text{Kraftstoffverbrauch}}{100 \text{ km}} \right) \times \text{CO}_2 - \text{Emissionsfaktor}$$

Formel 1: Formel zur Berechnung der Emission [57]

Die Formel ist relativ einfach und ermöglicht eine standardisierte Berechnung, die auf einem weit anerkannten Verfahren basiert. Sie bezieht sich auf den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeugs und den bekannten Emissionsfaktor des verwendeten Kraftstoffs (z.B. Benzin oder Diesel), der die Menge an CO₂ angibt, die bei der Verbrennung eines Liters Kraftstoff entsteht. [57]

Grenzwerte für Schadstoffemissionen von PKW

	Schadstoff in g/km	Euro 1 ab	Euro 1 ab		Euro 2* ab	Euro 3 ab	Euro 4 ab	Euro 5 ab	Euro 6 ab
Typprüfung Serienprüfung		01.01.1992 –	– 31.12.1992	neue Fzg. Typen alle Fahrzeuge	01.01.1996 01.01.1997	01.01.2000 01.01.2001	01.01.2005 01.01.2006	01.09.2009 01.01.2011	01.09.2014 01.09.2015
Richtlinie/ Verordnung (VO)		91/441/EWG	91/441/EWG		94/12/EG	98/69/EG	98/69/EG	VO EG 715/2007** i.V. mit VO EG 692/2008 und VO EG 459/2012	
Benzin	CO	2,72	3,16		2,2	2,3	1	1	1
	HC+NO _x	0,97	1,13		0,5	–	–	–	–
	THC	–	–		–	0,2	0,1	0,1	0,1
	NO _x	–	–		–	0,15	0,08	0,06	0,06
	Partikel- masse (PM)	–	–		–	–	–	0,0045 ⁽³⁾	0,0045 ⁽³⁾
	Partikelzahl (PN) (in Anzahl/km)	–	–		–	–	–		6,0 x 10 ¹¹ (4)
	NMHC	–	–		–	–	–	0,068	0,068
Diesel	CO	2,72	3,16		1	0,64	0,5	0,5	0,5
	HC+NO _x / THC+NO _x (ab Euro 5)	0,97	1,13		0,7/0,9 ⁽¹⁾	0,56	0,3	0,23	0,17
	NO _x	–	–		–	0,5	0,25	0,18	0,08
	Partikel- masse (PM)	0,14	0,18		0,08/0,10 ⁽²⁾	0,05	0,025	0,0045	0,0045
	Partikelzahl (PN) (in Anzahl/km)	–	–		–	–	–	6,0 x 10 ¹¹	6,0 x 10 ¹¹

ab Euro 2 werden die Grenzwerte nicht mehr nach Typ/Serie unterschieden.

Die Verordnungen EG 692/2008 und EG 459/2012 setzen die Verordnung EG 715/2007 um.

(1) Bei Fahrzeugen mit direktinspritzenden Dieselmotoren gilt bis zum 30.9.1999 der Grenzwert von 0,9 g/km

(2) Bei Fahrzeugen mit direktinspritzenden Dieselmotoren gilt bis zum 30.9.1999 der Grenzwert von 0,10 g/km

(3) Die Grenzwerte für die Partikelmasse gelten nur für Fremzündungsmotoren mit Benzin-Direkteinspritzung.

(4) Für Euro-6-Fahrzeuge mit fremdgezündeten Benzin-Direkteinspritzmotoren gilt nach Wahl des Herstellers für neue Typgenehmigungen bis zum 1.9.2017 bzw. für neue Fahrzeuge bis zum 1.9.2018 ein Emissionsgrenzwert für die Partikelzahl von 6,0 x 10¹² Partikel/km. Spätestens zu diesen Zeitpunkten ist ein Typgenehmigungs-Prüfverfahren einzuführen, das die wirksame Begrenzung der Partikelzahl sicherstellt.

Quelle: Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/pkw-leichtnutzfahrzeuge (Stand: August 2016)

Abbildung 15: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von PKW [58]

Abbildung 15 zeigt, dass innerhalb der EU-Dieselfahrzeuge typischerweise zwischen 0.5 bis 0,08 g/kg Stickoxide (NO_x) (in Betracht auf Euro 3 bis Euro 6), während Benzinfahrzeuge etwa 0,15 bis 0,06 g/kg NO_x ausstoßen (in Betracht auf Euro 3 bis Euro 6) emittieren [58]. Zudem kann man der Abbildung 15 entnehmen, dass Dieselfahrzeuge für höhere Feinstaubemissionen verantwortlich sind, insbesondere bei älteren

Fahrzeugen ohne Partikelfilter, was in der EU ein zunehmend dringendes Umweltproblem darstellt. [58]

Die Ergebnisse der Sachbilanz für den europäischen Fahrzeugmarkt zeigen, dass die Nutzung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren erhebliche Umweltauswirkungen hat. Dieselfahrzeuge schneiden zwar bei den CO₂-Emissionen – aufgrund ihres geringeren Kraftstoffverbrauchs – etwas besser ab, jedoch verursachen sie innerhalb der EU höhere Stickoxidemissionen und Feinstaubemissionen. Benzinfahrzeuge hingegen haben bei diesen Schadstoffen niedrigere Emissionen, jedoch führen sie in der Regel zu höheren CO₂-Emissionen im Vergleich zu Dieselfahrzeugen. [58]

Daher wird innerhalb der EU zunehmend auf strengere Abgasnormen, wie die Euro 6d-TEMP-Norm gesetzt, um diese Emissionen zu reduzieren. Die Einführung der Euro 6d-TEMP-Norm im Jahr 2018 stellt demnach einen bedeutenden Schritt zur Reduzierung der Schadstoffemissionen im Straßenverkehr dar [59]. Sie setzt strengere Anforderungen an die Emissionen von Neufahrzeugen, insbesondere für Stickoxide (NO_x) und Partikel, und fordert eine realistischere Emissionsmessung im täglichen Fahrbetrieb. Im Rahmen der Euro 6d-TEMP-Norm müssen Fahrzeuge die Emissionsgrenzwerte nicht nur im Prüfstandtest, sondern auch im täglichen Fahrbetrieb einhalten. Diese Norm reduziert die maximal erlaubte NO_x-Emission von Dieselfahrzeugen auf 0,08 g/km während Benzinfahrzeuge maximal 0,06 g/km emittieren dürfen [60].

Die Erkenntnisse der Analyse verdeutlichen die erheblichen Umweltwirkungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren in mehreren Bereichen. Im Hinblick auf den Klimawandel tragen ICEVs mit Gesamtemissionen von 30.336 kg CO₂ bis 32.860 kg CO₂ über ihre gesamte Lebensdauer zum Treibhauseffekt bei [57]. Zwar schneiden Dieselfahrzeuge aufgrund ihres geringeren Verbrauchs geringfügig besser ab, jedoch ist ihr Vorteil in der Klimabilanz begrenzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass hinsichtlich der Luftqualität Dieselfahrzeuge zu einer höheren Belastung durch Stickoxide führen, die zur Bildung von bodennahem Ozon und gesundheitsschädlichem Smog beitragen. Zudem belasten Feinstaubemissionen durch Dieselfahrzeuge die Atemluft und erhöhen das Risiko von Atemwegserkrankungen [61, S.2f]. In Bezug auf die Ressourcennutzung hat der hohe Verbrauch fossiler Brennstoffe erhebliche Auswirkungen. Er beschleunigt die Ausbeutung endlicher Rohstoffe und führt

zu einer wesentlichen Belastung für die Umwelt. Insgesamt verdeutlichen diese Erkenntnisse, dass ICEV nicht nur klimaschädliche Emissionen freisetzen, sondern auch die Luftqualität beeinträchtigen und die natürlichen Ressourcen stark beanspruchen.

4.2.3 Recyclingstrategien und Rohstoffkreisläufe

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sind aufgrund ihres komplexen Materialmixes und hohen Ressourcenverbrauchs ein zentraler Punkt in der Diskussion um Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Rohstoffnutzung. Im Rahmen dieser Lebenszyklusanalyse liegt der Fokus dieses Kapitels ausschließlich auf der Untersuchung von Recyclingstrategien und Rohstoffkreisläufen für ICEVs. Dabei wird die End-of-Life-Phase der Fahrzeuge betrachtet, um die Wiederverwendbarkeit der verwendeten Materialien zu analysieren und die Möglichkeiten zur Schließung von Materialkreisläufen zu bewerten. Abbildung 16 veranschaulicht den Ansatz der Kreislaufwirtschaft und zeigt wie die unterschiedlichen Phasen – von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Abfallbewirtschaftung – miteinander verbunden sind. Die Abbildung zeigt ebenfalls, dass der Kreislauf möglichst geschlossen sein sollte, um Ressourcen zu schonen und Abfälle zu minimieren. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Modell der Kreislaufwirtschaft darauf abzielt, weniger Rohstoffe zu verbrauchen, weniger Abfall zu produzieren und Emissionen zu reduzieren [62].



Abbildung 16: Modell der Kreislaufwirtschaft: weniger Rohstoffe, weniger Abfall, weniger Emissionen [62]

Die Fahrzeugherstellung steht am Anfang des Lebenswegs und spielt eine wichtige Rolle im Lebenszyklus von Fahrzeugen. Dabei spielen nicht nur der Aufwand für die Herstellung und Entsorgung der Fahrzeugkomponenten eine Rolle, sondern auch die Wahl der Materialien und Bauteile, die das Fahrzeuggewicht beeinflussen und somit auf die Nutzungsphase auswirken.

ICEVs bestehen aus einer Vielzahl von Materialien, die sich unterschiedlich gut recyceln lassen. Metalle wie Stahl, Aluminium und Eisen machen etwa 70% der Fahrzeugmasse aus [63] und erreichen in der EU-Recyclingquote einen Wert von über 90% [64]. Diese hohe Rückgewinnungsrate reduziert den Bedarf an energieintensiver Primärproduktion erheblich. Neben den Metallen sind ebenfalls Kunststoffe mit einem Anteil von 12-15% ein wesentlicher Bestandteil von konventionellen Fahrzeugen [65]. Trotz ihrer Bedeutung im Automobilbau ist die Recyclingrate von Kunststoffen im Vergleich zu Metallen deutlich geringer. Dies liegt an unterschiedlichen technologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen, die den Recyclingprozess erschweren.

Das Kunststoffrecycling steht vor mehreren Herausforderungen, darunter die Vielfalt der Materialien, Verunreinigungen sowie der Einsatz von Additiven und Füllstoffen. Diese Faktoren führen häufig zu einem Downcycling, bei den minderwertigen Materialien entstehen. Dadurch verringern sich sowohl die Qualität als auch der Wert des recycelten Kunststoffs, wodurch er sich weniger für hochwertige Anwendungen wie den Einsatz in neuen Fahrzeugen eignet. [77, S. 403]

Interessant ist jedoch, dass aktuelle Entwicklungen zeigen, dass bereits unterschiedliche Ansätze verfolgt wurden, um den Herausforderungen des Kunststoffrecyclings in der Automobilindustrie zu begegnen, wie beispielsweise durch die Verbesserung von Recyclingtechnologien, das Design für Recycling und die Einführung regulatorischer Maßnahmen. [66]

Im Kontext der Lebenszyklusanalyse spielt ebenfalls die Recyclingfähigkeit von Katalysatoren eine wesentliche Rolle. Diese enthalten Edelmetalle wie Platin, Palladium und Rhodium, die nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich von zentraler Bedeutung sind, da sie nur in begrenztem Maße verfügbar sind. Eine der größten Herausforderungen ist die bisher unzureichende Recyclingquote innerhalb der EU, was dazu führt, dass ein erheblicher Anteil dieser wertvollen Ressourcen verloren geht.

Der europäische Grüne Deal, der als Teil der Klimastrategie darauf abzielt, die Union bis 2050 klimaneutral zu machen, fördert aktiv die Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz. Dies beinhaltet strengere Vorgaben für das Recycling von Materialien, einschließlich der Edelmetalle in Katalysatoren. Der Grüne Deal fördert Investitionen in innovative Recyclingtechnologien, die dazu beitragen sollen, den Verlust

von wertvollen Ressourcen zu reduzieren und die Rückgewinnung von Edelmetallen zu steigern. [67]

Die Europäische Union arbeitet aktiv daran, strengere Vorgaben und Richtlinien einzuführen, um die Rückgewinnungsrate zu steigern und die Kreislaufwirtschaft in der Automobilindustrie zu fördern, welches auch das Recycling von Katalysatoren umfasst.

Im Kontext der Kreislaufwirtschaft und der Ressourceneffizienz spielt das Recycling von Materialien wie Blei-Säure-Batterien und Katalysatoren eine zentrale Rolle. Ähnlich wie bei den wertvollen Edelmetallen in Katalysatoren, die in Fahrzeugen eingesetzt werden, sind Blei-Säure-Batterien ein weiteres Beispiel für erfolgreiches Recycling in der EU. Die Batterien enthalten wertvolle Materialien wie Blei, das zu fast 95% recycelt wird. Durch den gut etablierten Recyclingprozess können nahezu alle Bestandteile, einschließlich des Bleis und der Säure, zurückgewonnen und wiederverwendet werden. [68, S7f.] Dies zeigt, dass effizientes Recycling von Ressourcen innerhalb der EU bereits in großem Maßstab funktioniert.

Blei-Säure-Batterien bieten demnach ein erfolgreiches Modell für das Recycling von wertvollen Rohstoffen. Auch bei Katalysatoren könnte durch den Ausbau von Recyclingtechnologien und strenger EU-Vorgaben für das Recycling von Edelmetallen ein ähnlicher Erfolg erzielt werden.

Die Lebenszyklusanalyse zeigt, dass die Automobilindustrie in der EU bei Recyclingstrategien und der Ressourcennutzung deutliche Fortschritte machen muss. Dies betont ebenfalls Barbara Metz, Bundesgeschäftsführerin der Deutschen Umwelthilfe, indem sie folgendes äußert:

„Die Automobilindustrie hat im Bereich der Kreislaufwirtschaft akuten Nachholbedarf. In der EU-Fahrzeugverordnung braucht es ambitionierte und verbindliche Vorgaben, damit in Zukunft deutlich weniger Ressourcen verbraucht und mehr im Kreislauf gehalten werden. Im Entwurf fehlen jedoch Maßnahmen gegen den Trend zu immer größeren Fahrzeugen, zur Begrenzung des CO₂-Ausstoßes in der Produktion, Vorgaben für eine gute Reparierbarkeit sowie Anreize zur Nutzung gebrauchter Ersatzteile. Außerdem muss es Vorgaben für den Einsatz von Recyclingmaterial nicht nur für Kunststoffe, sondern auch für Stahl, Aluminium und seltene Erden geben.“ [69]

Die Kritik verdeutlicht, dass technologische Fortschritte und politische Maßnahmen Hand in Hand gehen müssen. Konkret sollten Recyclingmaterialien stärker gefördert werden, um den Einsatz von Primärrohstoffen für Stahl, Aluminium und Kunststoffe zu verringern. Weiterhin sollten verbindliche Quoten für Recyclingmaterial in der EU-Fahrzeugverordnung verankert werden. Außerdem sollte die Reparierbarkeit und Wiederverwendung durch gesetzliche Vorgaben unterstützt werden, etwa durch Anreize für den Einsatz gebrauchter Ersatzteile.

Dies verdeutlicht Thomas Fischer, der Leiter der Kreislaufwirtschaft der DUH, der erklärt:

„In der Fahrzeugverordnung muss das Recht auf Reparatur verankert werden, damit die unabhängige Reparaturbranche im Kfz-Bereich erhalten bleibt. Anderenfalls könnten Fahrzeuge schon nach wenigen Jahren ausgemustert werden müssen, weil ihre Software nicht mehr sicher oder eine Reparatur zu teuer ist. Hersteller müssen daher verpflichtet werden, für mindestens 20 Jahre nach dem Kauf günstige Ersatzteile, Softwareupdates und Reparaturinformationen für unabhängige Werkstätten zu garantieren. Außerdem muss die Nutzung wiederverwendeter oder wiederaufbereiteter Ersatzteile gefördert werden, um die Preise für Reparaturen gering zu halten.“ [69]

Die Zitate von Metz und Fischer unterstreichen nochmal die Notwendigkeit ambitionierter regulatorischer Maßnahmen, um die Umweltwirkungen von ICEVs zu minimieren und eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu fördern.

Die Analyse zeigt, dass ICEVs über ein großes Potenzial für die Schließung von Materialkreisläufen verfügen. Während Metalle und Batterien bereits hohe Recyclingquoten erreichen, sind Kunststoff und Edelmetalle Bereiche mit besonderem Handlungsbedarf. Um die Kreislaufwirtschaft zu stärken sind technologische Innovationen, gesetzliche Vorgaben und finanzielle Anreize notwendig. Ein effizienter Rohstoffkreislauf trägt nicht nur zur Reduktion von Umweltbelastung bei, sondern stärkt auch den Ressourcenschutz und fördert die Nachhaltigkeit.

4.3 Vergleich der Antriebstechnologien (BEV vs. ICEV)

Im folgenden Kapitel wird ein Vergleich der Antriebstechnologien BEV und ICEV vorgenommen. Dabei wird besonders auf die drei zentralen Aspekte wie den Ressourcenverbrauch, den Energiebedarf sowie die Recyclingfähigkeit eingegangen. Zudem werden Strategien für eine nachhaltigere Nutzung und Entwicklung beider Technologien beleuchtet, um anschließend im nachfolgenden Kapitel die ökologischen und sozialen Herausforderungen besser zu verstehen und Lösungen aufzuzeigen.

4.3.1 Ressourcenverbrauch: Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe

Die LCA startet mit dem Vergleich des Ressourcenverbrauchs. Die Analyse zeigt, dass beide Fahrzeugtypen in den Bereichen Rohstoffgewinnung und Fahrzeugproduktion erhebliche Umweltbelastungen verursachen [23, S.40f]. Die Ergebnisse der LCA zeigen deutlich, dass bei BEVs insbesondere die Rohstoffgewinnung für die Batterieproduktion eine zentrale Rolle spielt. Dabei ist die Gewinnung von Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit entscheidend, da diese Materialien für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien benötigt werden [23, S.28f.]. Die Rohstoffgewinnung ist jedoch mit erheblichen ökologischen und sozialen Herausforderungen verbunden. Insbesondere in Regionen, in denen diese Materialien abgebaut werden [23, S.39]. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lithiumextraktion, vor allem im Lithiumdreieck (Chile, Bolivien, Argentinien), mit hohem Wasserverbrauch und Umweltzerstörungen verbunden ist [23, S.41]. Auch die Gewinnung von Kobalt aus der Demokratischen Republik Kongo, ist problematisch, da sie mit Kinderarbeit und schweren Umweltproblem einhergeht [23, S.45].

Darüber hinaus ist die Produktion von Batterien energieintensiv, was zu hohen CO₂-Emissionen führt, wie die LCA ebenfalls verdeutlicht [23, S.46]. Die LCA zeigt jedoch auch, dass der CO₂-Fußabdruck der Batterieproduktion durch den Einsatz erneuerbarer Energien und recycelter Materialien erheblich reduziert werden kann. So zeigt die Analyse, dass in Regionen mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien der CO₂-Ausstoß bei der Batterieproduktion deutlich geringer ausfällt.

Im Gegensatz dazu betrachtet die LCA bei ICEVs die Rohstoffgewinnung für Materialien wie Stahl, Aluminium und Edelmetalle, die für die Abgasreinigungssysteme der Fahrzeuge benötigt werden [47]. Die Herstellung von Stahl und Aluminium ist ebenfalls

sehr energieintensiv und führt zu hohen CO₂-Emissionen. Die Analyse verdeutlicht, dass insbesondere die Stahlproduktion einen bedeutenden Beitrag zu den CO₂-Emissionen der Fahrzeugproduktion leistet. So macht die Stahlproduktion einen erheblichen Anteil der Emissionen aus. [48]

Dennoch bietet der Übergang zu „grünem Stahl“ durch den Einsatz von Wasserstoff Potenzial, den CO₂-Ausstoß erheblich zu senken [48]. Auch die Aluminiumproduktion und der Abbau von Edelmetallen wie Platin und Palladium, die für Katalysatoren verwendet werden, verursachen hohe CO₂-Emissionen. Diese Edelmetalle sind entscheidend für die Reduktion von Schadstoffen in den Abgasen von ICEVs, was die Bedeutung ihrer umweltfreundlicheren Gewinnung und Verwendung unterstreicht [51, S.3].

Bei beiden Fahrzeugtypen wird sowohl der Ressourcenverbrauch als auch die entstehenden CO₂-Emissionen hauptsächlich durch die Herstellung der Fahrzeuge und die Gewinnung von Rohstoffen bestimmt. Die Analyse verdeutlicht, dass die Umweltbilanz stark vom verwendeten Strommix abhängt. In Regionen mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien können die CO₂-Emissionen durch den Einsatz sauberer Energien erheblich gesenkt werden.

Die LCA-Ergebnisse zeigen auch, dass die EU bereits eine Strategie zur Reduzierung der Umweltbelastungen durch beide Fahrzeugtypen verfolgt. Ein zentraler Bestandteil dieser Strategie ist die Förderung von Recyclingmaßnahmen und der Ausbau erneuerbarer Energien. Die Entwicklung von grünem Stahl, die verstärkte Nutzung von recycelten Materialien in der Batteriefertigung und der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur sind wichtige Ansätze, um die CO₂-Emissionen zu senken und den CO₂-Fußabdruck der BEVs und der ICEVs zu verringern [48].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die LCA für beide Fahrzeugtypen erhebliche Umweltbelastungen in der Rohstoffgewinnung und Fahrzeugproduktion aufzeigt. Die Analyse verdeutlicht jedoch auch das Potenzial zur Verbesserung der Umweltbilanz durch technologische Weiterentwicklung, durch den Einsatz erneuerbarer Energien, den verstärkten Einsatz von Recyclingmaterialien und die Entwicklung nachhaltigerer Herstellungsverfahren. Beide Fahrzeugtypen erfordern somit fortlaufende technologische Weiterentwicklungen und politische Maßnahmen, um die Umweltauswirkungen zu minimieren und den Übergang zu einer nachhaltigeren Mobilität zu fördern.

4.3.2 Energiebedarf: Einfluss unterschiedlicher Energiemixe und Emissionen

In diesem Kapitel steht der Energiebedarf im Fokus. Die Lebenszyklusanalyse verdeutlicht, dass unterschiedliche Umweltbelastungen in der Nutzungsphase der Fahrzeuge entstehen. Im Fokus der Analyse stehen vor allem die CO₂-Emissionen und Luftschadstoffe, deren Mengen in starkem Maße vom Energiemix des jeweiligen Landes abhängen. Die LCA zeigt somit nicht nur die Umweltbelastungen der Fahrzeuge auf, sondern verdeutlicht auch, wie der Energiemix und der Kraftstoffverbrauch als zentrale Einflussfaktoren in der Klimabilanz zu bewerten sind.

Die Analyse zeigt, dass für BEVs die Umweltbelastung während der Nutzung je nach Land erheblich variiert, da der CO₂-Ausstoß direkt mit dem Energiemix des jeweiligen Landes verknüpft ist. In Ländern mit einem hohen Anteil an fossilen Energien, wie beispielsweise Deutschland und Polen, liegt der CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde Strom bei etwa 380 g CO₂ (Deutschland) bzw. 661,93 g CO₂ (Polen) [28]. In diesen Ländern verursacht der Energieverbrauch während der Nutzung von BEVs deutlich höhere CO₂-Emissionen.

Hingegen zeigt die LCA, dass in Ländern wie Norwegen und Frankreich, die überwiegend auf erneuerbare Energien oder Kernenergie setzen, der CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde deutlich niedriger ist. Norwegen erzeugt fast seinen gesamten Strom aus erneuerbaren Quellen (insbesondere Wasserkraft) und hat ein Emissionsfaktor von nur 30,05 g CO₂/kWh, was zu einer nahezu emissionsfreien Nutzung von BEVs führt [28]. In Frankreich liegt der CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde bei 56 gCO₂, was ebenfalls zu einer besseren Klimabilanz der BEVs beiträgt [25]. Diese Ergebnisse verdeutlichen, wie die LCA den starken Einfluss des regionalen Energiemixes auf die Umweltauswirkungen von BEVs aufzeigt.

Im Gegensatz dazu ist der CO₂-Ausstoß von ICEVs während der Nutzung vorwiegend vom Kraftstoffverbrauch und der Art des verwendeten Kraftstoffs abhängig. Diesel- und Benzinfahrzeuge weisen unterschiedliche Emissionswerte auf. Diesel hat einen Emissionsfaktor von 2,65 kg CO₂ pro Liter Kraftstoff, während Benzin bei 2,37 kg CO₂ pro Liter liegt [56, S.9]. Ein durchschnittliches Dieselfahrzeug mit einem Verbrauch von 6,2 Litern pro 100 km verursacht über eine Lebensdauer von 200.000 Kilometer etwa

32.860 kg CO₂, während ein Benzinfahrzeug mit einem Verbrauch von 6,4 Litern pro 100 Kilometer etwa 30.336 kg CO₂ produziert [53].

Dieselfahrzeuge weisen aufgrund ihres geringeren Verbrauchs zwar etwas bessere CO₂-Werte auf, verursachen jedoch gleichzeitig höhere Emissionen von Stickoxiden und Feinstaub. Diese Luftschadstoffe verschlechtern die Luftqualität erheblich. Insbesondere Dieselfahrzeuge ohne Partikelfilter stellen ein wachsendes Umweltproblem dar, was durch die LCA deutlich wird. [61, S.2f]

Trotz technologischer Weiterentwicklung bei Abgasnachbehandlungssystemen bleibt die Nutzung von ICEVs eine der Hauptquellen für CO₂-Emissionen und Luftverschmutzung im Verkehrssektor. Die Analyse zeigt nämlich, dass die Umweltauswirkungen von ICEVs in Bereichen wie Klimawandel und Luftqualität erheblich sind. Während in Ländern mit einem fossilen Energiemix wie Deutschland und Polen BEVs immer noch eine bessere Klimabilanz aufweisen als ICEVs, zeigt die Analyse, dass eine konsequente Dekarbonisierung des Stromsektor notwendig ist, um das volle Potenzial von BEVs zur Emissionsreduktion auszuschöpfen.

Die Ergebnisse der LCA zeigen also deutlich, dass der Vergleich von BEVs und ICEVs nicht nur eine Analyse der direkten CO₂-Emissionen umfasst, sondern auch den Einfluss des regionalen Energiemixes und der Technologie auf die Umweltauswirkungen berücksichtigt. In Ländern mit sauberem Energiemix (z.B. Norwegen, Frankreich) verursachen BEVs deutlich weniger Emissionen, während in Ländern mit einem fossilen Energiemix die Umweltbilanz von BEVs von der Stromproduktion abhängt. ICEVs bleiben trotz Fortschritten in der Motorentechnologie und Abgasnachbehandlung eine erhebliche Quelle für CO₂-Emissionen und Luftverschmutzung. Die LCA verdeutlicht also, dass BEVs in einem sauberen Stromnetz zur Reduktion von Emissionen beitragen können, während die Reduktion der Emissionen von ICEVs durch technologische Fortschritte weiterhin begrenzt bleibt.

Zusammengefasst zeigt die Lebenszyklusanalyse, dass der Vergleich von BEVs und ICEVs eine komplexe Betrachtung der Umweltauswirkungen erfordert, bei der sowohl die CO₂-Emissionen als auch die Luftschadstoffe und der regional unterschiedliche Energiemix berücksichtigt werden. BEVs bieten in Ländern mit erneuerbaren Energiequellen ein starkes Potenzial zur Reduktion von Emissionen, während ICEVs

aufgrund ihrer Emissionen in der Nutzungsphase weiterhin eine erhebliche Umweltbelastung darstellen.

4.3.3 Recyclingfähigkeit und Strategien zur Nachhaltigkeit

BEVs und ICEVs unterscheiden sich deutlich in ihrer Materialzusammensetzung und den damit verbundenen Herausforderungen und Potenzialen im Recycling. Die Lebenszyklusanalyse zeigt, dass BEVs insbesondere auf die Wiederverwertung von Batteriematerialien wie Lithium, Kobalt, Nickel und Graphit angewiesen sind. Diese Rohstoffe sind nicht nur von hoher Bedeutung und Wert, sondern auch kritisch für die Batterieproduktion [43]. Die Ergebnisse zeigen, dass die aktuellen Recyclingquoten für diese Materialien noch unzureichend sind, was die Dringlichkeit technologischer Fortschritte in diesem Bereich unterstreicht.

Im Gegensatz dazu erreichen ICEVs bei Metallen wie Stahl, Aluminium und Eisen sehr hohe Recyclingraten, die den Bedarf an Primärproduktion signifikant senken, was in der LCA als ein klarer Vorteil erkannt wird [64].

Ein besonders herausforderndes Thema stellt die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Katalysatoren in ICEVs dar [67]. Die LCA zeigt, dass die Recyclingquoten in der EU bislang unzureichend sind. Zudem haben Kunststoffe in ICEVs im Vergleich zu Metallen eine geringere Recyclingfähigkeit und werden oft nur downgecycelt [21]. BEVs hingegen verfolgen eine Recyclingstrategie, die stärker auf die Schließung von Materialkreisläufen abzielt, was durch die Analyse als zukunftssträchtiger Ansatz hervorgehoben wird. Die technologische Entwicklung bleibt jedoch ein kritischer Faktor, um diese Potenziale vollständig zu erschließen.

Die Blei-Säure-Batterien, die für ICEVs als positives Beispiel für nahezu vollständige Recyclingfähigkeit gelten, zeigen, dass BEVs hier noch nicht dasselbe Niveau erreicht haben. [68, S7f.]

Beide Fahrzeugtypen verfolgen unterschiedliche Ansätze zur Verbesserung der Nachhaltigkeit. BEVs setzen eher auf den Aufbau geschlossener Materialkreisläufe und die Integration erneuerbarer Energien in den Produktionsprozess. Die LCA zeigt, dass politische Programme wie der „Europäische Grüne Deal“ und „Fit für 55“ gezielt

Recyclinginitiativen und die Reduktion der Abhängigkeit von Primärrohstoffen fördern. Ein zentraler Fokus liegt auf der Entwicklung neuer Recyclingtechnologien, um die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe zu steigern. [40]

ICEVs hingegen setzen auf die Verbesserung bestehender Recyclingprozesse und strengere Vorschriften. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass dies vor allem die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Katalysatoren und die Wiederverwendbarkeit von Ersatzteilen fördert. Trotz der hohen Recyclingquoten von Metallen bleibt das Kunststoffrecycling problematisch. Politische Maßnahmen wie verbindliche Recyclingquoten, Anreize zur Reparierbarkeit und das Recht auf Reparatur sollen die Nachhaltigkeit weiter steigern. Hier zeigt sich ein höherer Handlungsbedarf im Vergleich zu den umfassenden Recyclingstrategien der BEVs. [69]

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass beide Fahrzeugtypen in verschiedenen Bereichen Stärken und Schwächen aufweisen. Die LCA verdeutlicht, dass BEVs noch am Anfang der Entwicklung effizienter Recyclingprozesse für ihre Batterien stehen, jedoch das Potenzial haben, durch die Integration erneuerbarer Energien und geschlossener Materialkreisläufe nachhaltiger zu werden. ICEVs profitieren von etablierten Recyclingprozessen, insbesondere bei Metallen. Sie müssen jedoch bei Kunststoffen und Edelmetallen aufholen, da die Recyclingprozesse weniger effizient sind. Beide Ansätze erfordern politische Unterstützung und technologische Innovation, um ihre jeweiligen Herausforderungen zu bewältigen und den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft zu fördern.

5 Ergebnisdarstellung

In den folgenden Kapiteln werden die zuvor analysierten Ergebnisse der LCA in Hinblick auf die Vor- und Nachteile beider Antriebstechnologien, die CO₂-Bilanz und die Ressourcennutzung sowie Herausforderungen und Unsicherheiten zusammenfassend dargestellt.

5.1 Vor- und Nachteile beider Antriebstechnologien bzgl. der Nachhaltigkeit

Der Einstieg in die Ergebnisdarstellung geschieht mit den drei Aspekten der Nachhaltigkeit. Nach der umfassenden Lebenszyklusanalyse, wird deutlich, dass sowohl BEVs als auch ICEVs hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit unterschiedliche Vor- und Nachteile haben. Nachhaltigkeit umfasst ökologische, soziale und ökonomische Aspekte, die auch in der oben durchgeführten Analyse berücksichtigt wurden.

Ökologisch sind die BEVs im Betrieb klar im Vorteil, da sie lokal emissionsfrei sind und weder CO₂ noch Luftschadstoffe wie Stickoxide oder Feinstaub ausstoßen. Zudem sind sie wesentlich energieeffizienter als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Allerdings ist die Produktion von BEVs, insbesondere die Herstellung der Batterien ressourcenintensiv und energieintensiv. Der Abbau von Rohstoffen wie Lithium, Kobalt und Nickel belastet Ökosysteme und verursacht erhebliche Umweltschäden. [23, S.46]

ICEVs hingegen erfordern bei der Herstellung weniger Energie und Rohstoffe, verursachen jedoch während der Nutzung erhebliche Mengen an CO₂ und Schadstoffe, die langfristig zum Klimawandel und zur Verschlechterung der Luftqualität beitragen.

Sozial bieten BEVs Vorteile, da sie durch den emissionsfreien Betrieb die Luftqualität in Städten verbessern und gesundheitliche Belastungen reduzieren. Gleichzeitig gibt es jedoch soziale Herausforderungen, insbesondere bei der Gewinnung von Rohstoffen für die Batterien. Der Abbau von Lithium und Kobalt findet oft in Ländern mit schwachen Arbeitsbedingungen und Umweltstandards statt. Dies führt zur Ausbeutung und Konflikten [23, S.45f]. ICEVs sind in diesem Bereich weniger problematisch, da ihre Herstellung auf bereits etablierte und besser regulierte Prozesse zurückgreifen kann. Allerdings tragen die Emissionen von ICEVs in urbanen Gebieten erheblich zu gesundheitlichen Problemen bei, was wiederum soziale Folgen verursacht.

Aus ökonomischer Sicht überzeugen BEVs durch geringere Betriebskosten, da Strom oft günstiger ist als fossile Kraftstoffe. Die Wartungskosten durch weniger bewegliche Teile im Elektromotor sind niedriger. Jedoch sind die Anschaffungskosten von BEVs, vor allem aufgrund der Batterien, derzeit höher als die von konventionellen Fahrzeugen. ICEVs haben niedrigere Anschaffungskosten und können auf eine ausgereifte Infrastruktur für Betankung und Wartung zurückgreifen. Allerdings sind sie langfristig von fossilen Brennstoffen abhängig, deren Preise Schwankungen unterliegen und tendenziell steigen. [75] Diese Abhängigkeit kann zu erhöhten Betriebskosten führen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass BEVs langfristig nachhaltiger sind, insbesondere wenn der Strom aus erneuerbaren Energien stammen. ICEVs sind kurzfristig ressourcenschonender in der Produktion und günstiger in der Anschaffung. Sie verursachen jedoch durch ihre hohe Emission während der Nutzung erhebliche ökologisch und soziale Kosten. Der Übergang zu einer nachhaltigeren Mobilität erfordert daher eine stärkere Förderung der Elektromobilität, sowie die Entwicklung einer umweltfreundlichen Produktions- und Lieferkette, insbesondere für die Batterien.

Abbildung 17 zeigt eine tabellarische Übersicht der wichtigsten Unterschiede. Sie dient abschließend der Übersicht und fasst die beschriebenen Vor- und Nachteile beider Fahrzeugtypen im Kontext der Nachhaltigkeit zusammen.



 BEV	KRITERIUM	ICEV 
<ul style="list-style-type: none"> • Lokal emissionsfrei • Hohe Effizienz • Ressourcenintensive Batterieproduktion 	ökologische Aspekte	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Emissionen im Betrieb • Fossile Abhängigkeit • Etablierte Recyclingprozesse
<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Luftqualität • Problematische Rohstoffförderung 	soziale Aspekte	<ul style="list-style-type: none"> • Etablierte Lieferkette • Gesundheitsbelastung durch Schadstoffe
<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Betriebskosten • Hohe Anschaffungskosten 	ökonomische Aspekte	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrige Anschaffungskosten • Langfristig höhere Betriebskosten durch fossile Brennstoffe

Abbildung 17: Vor- und Nachteile BEVs und ICEVs

5.2 Bewertung der CO₂-Bilanz und der Ressourcennutzung

Um die CO₂-Bilanz und die Ressourcennutzung von BEVs und ICEVs bewerten zu können, sollte der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt werden. Sie unterscheiden sich nämlich deutlich, je nach Lebenszyklusphase. Im Folgenden wird die Gesamtbewertung der CO₂-Bilanz und die Ressourcennutzung bei der Fahrzeugtypen zusammenfassend dargestellt.

Wie bereits in der Analyse dargestellt haben BEVs im Vergleich zu ICEVs, aufgrund der energieintensiven Batterieproduktion, eine hohe CO₂-Belastung in der Phase ihrer Herstellung. Die Herstellung von Batterien ist mit einem hohen Energieaufwand verbunden und erfordert bestimmte kritische Rohstoffe. Insbesondere der Abbau von Lithium, Nickel und Kobalt ist äußerst energieintensiv und hat erhebliche Auswirkungen, wie die LCA deutlich zeigt. Die Rohstoffe werden aus politischen instabilen Regionen in die EU importiert, was zu sozialen und ökonomischen Problemen führt. ICEVs hingegen werden weniger energieintensiv hergestellt. Die Produktion benötigt weniger seltene Rohstoffe. Es werden hauptsächlich Stahl, Aluminium und Kunststoff benötigt, die einfacher zu gewinnen sind. Abbildung 18 zeigt die Gesamtbewertung der Ressourcennutzung. Sie stellt nochmal die einzelnen Kriterien der beiden Fahrzeugtypen gegenüber und stellt somit die oben genannten Aspekte übersichtlich dar.



 BEV	KRITERIUM	ICEV 
Hoher Bedarf an Lithium, Kobalt, Nickel	Rohstoff-gewinnung	Hoher Bedarf an Erdöl
Ressourcenkosten durch Batterien hoch	Herstellung	Geringer Ressourcenverbrauch
Geringer Verbrauch (bei erneuerbarem Strom)	Nutzung	Hoher Verbrauch fossiler Brennstoffe
Komplexes Recycling erforderlich	Entsorgung	Einfaches Recycling
Verbesserungen durch Recycling und neue Batterietechnologien	Langfristiges Potenzial	Keine signifikante Verbesserung möglich

Abbildung 18: Gesamtbewertung der Ressourcennutzung

Auch während der Nutzungsphase erzeugen BEVs keine direkten Emissionen. Der Stromverbrauch hängt stark vom Strommix ab. Die LCA zeigt deutlich, dass in Ländern mit erneuerbaren Energien – wie beispielsweise Norwegen und Frankreich –, die CO₂-Bilanz von BEVs sehr gut ist. In Ländern mit fossilem Energiemix – wie beispielsweise Polen und Deutschland – können die Emissionen vergleichsweise hoch sein. Abbildung 19 zeigt die Gesamtbewertung der CO₂-Bilanz. Hierbei werden die BEVs und die ICEVs in den Bereichen Herstellung, Nutzung, Entsorgung und langfristiges Potenzial verglichen. Die Abbildung 19 macht deutlich, dass BEVs in der Herstellung höhere CO₂-Emissionen verursachen, aber bei der Nutzung erneuerbarer Energien deutlich geringere Emissionen als ICEVs haben. Ebenfalls dargestellt ist, dass BEVs langfristig ein großes Reduktionspotenzial bieten, während ICEVs keine wesentliche Reduktion ermöglichen.


 BEV	KRITERIUM	ICEV 
Höhere CO ₂ -Emissionen (Batterien)	Herstellung	Geringere Emissionen
Sehr niedrige Emissionen (bei sauberem Strom) oder hoch (fossiler Strom)	Nutzung	Konstant hoch
Recycling potenziell aufwändig	Entsorgung	Weniger aufwändig
Sehr hoch (erneuerbare Energien)	Langfristiges Potenzial	Gering (keine Reduktion möglich)

Abbildung 19: Gesamtbewertung der CO₂-Bilanz

ICEVs verursachen während des gesamten Lebenszyklus konstante und hohe CO₂-Emissionen, die durch den Kraftstoffverbrauch bedingt sind. Der ständige Kraftstoffverbrauch macht ICEVs besonders ressourcenintensiv. Die Nutzung basiert auf fossilen Brennstoffen, die durch Bohrung, Förderung und Raffinierung enorme Ressourcen verbrauchen. Die Entsorgung von BEVs stellt eine Herausforderung dar, da insbesondere das Recycling der Batterien ein komplexer Prozess ist. Dabei müssen wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen werden, was technisch anspruchsvoll und energieintensiv ist. Zudem erfordert die umweltgerechte Aufbereitung spezielle Verfahren, um Schadstoffe zu minimieren und eine nachhaltige Wiederverwertung der Materialien zu gewährleisten. Batterierecycling ist entscheidend für die CO₂-Bilanz. Fortschritte im Recyclingprozess können die Bilanz enorm verbessern. Die Entsorgungsphase eines ICEVs erfordert insgesamt weniger aufwändige Recyclingprozesse. Damit ist gemeint, dass keine komplexen Batterien verarbeitet werden müssen und somit die Entsorgung weniger CO₂-intensiv ist. Die LCA zeigte, dass Metalle in diesem Prozess effektiv recycelt werden, was zu einer hohen Recyclingquote führt. Dadurch wird der CO₂-Ausstoß deutlich gesenkt, da das Recycling weniger Energie erfordert. Abbildung 20 zeigt die Gesamtbewertung und dient der Übersicht.



BEV 	KRITERIUM	ICEV 
Hohe Emissionen bei der Herstellung aber sehr gute Bilanz bei sauberem Strom	CO₂-Bilanz	Konstante, hohe Emissionen über den gesamten Lebenszyklus
Hoher Rohstoffbedarf (Lithium, Kobalt) aber optimierbar durch Recycling	Ressourcen-nutzung	Kontinuierlich hoher Ressourcenverbrauch (Erdöl)

Abbildung 20: Gesamtbewertung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei den BEVs die schlechtere CO₂-Bilanz, die bei der Herstellung entsteht, durch eine saubere Nutzung (besonders bei grünem Strom) „kompensiert“ wird. Der Ressourcenverbrauch ist in der Herstellung höher, aber langfristig durch Recycling und erneuerbare Energien optimierbar. ICEVs haben konstante CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. Ihre CO₂-Bilanz bleibt deutlich schlechter, insbesondere bei längerer Nutzung. Sie bleiben aufgrund ihres ständigen Verbrauchs fossiler Brennstoffe ressourcenintensiver. In der Gesamtbetrachtung haben BEVs ein höheres Potenzial für eine positive CO₂-Bilanz, besonders in Ländern mit einem emissionsarmen Energiemix.

5.3 Herausforderungen und Unsicherheiten

Die Lebenszyklusanalyse verdeutlicht, dass es bei BEVs spezifische Herausforderungen und Unsicherheiten gibt, die eine vergleichbare Bewertung erschweren. Besonders deutlich zeigen sich diese Unterschiede im Bereich der Batterien von BEVs. Die Produktion ist nicht nur energieintensiv, sondern belastet auch die Umwelt erheblich. Die damit verbundenen Auswirkungen hängen stark von der Herkunft der Rohstoffe ab. Wie bereits in Kapitel 4.1.1 dargestellt, verschärfen die sozialen und ökologischen Probleme bei der Rohstoffgewinnung sowie Unsicherheiten über die zukünftige Verfügbarkeit dieser Herausforderungen zusätzlich.

Ein weiterer wesentlicher Punkt betrifft die Energieversorgung während der Nutzung eines batteriebetriebenen Fahrzeuges. Die Analyse zeigt, dass die Umweltbilanz stark vom regionalen Strommix abhängt. Insbesondere in Ländern mit einem hohen Anteil fossiler Energieträger ist der Vorteil von BEVs gegenüber ICEVs deutlich weniger.

Auch die End-of-Life Phase, also die Phase des Recyclings und der Entsorgung, weist erhebliche Unsicherheiten auf. Die Ergebnisse zeigen, dass etablierte Technologien für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien fehlen. Fortschritte in diesem Bereich könnten die Umweltbilanz verbessern. Allerdings sind solche Entwicklungen derzeit schwer abzuschätzen.

Im Vergleich dazu zeigen sich bei ICEVs andere Herausforderungen. Die Förderungen und Verarbeitung von Erdöl sind mit ökologischen Risiken und schwankenden Effizienzzraten verbunden. Auch die Emissionen von CO₂, NO_x und Feinstaub hängen stark vom Fahrverhalten ab. Zukünftige Entwicklungen, wie der Einsatz von alternativen Kraftstoffen (E-Fuels) können die Umweltbilanz von ICEVs verändern. [70]

Zusätzlich wird deutlich, dass ICEVs aus Materialien wie Stahl und Aluminium bestehen. Diese Materialien sind zwar recycelbar, erfordern jedoch einen hohen Energieaufwand. Darüber hinaus beeinflusst die Alterung von Fahrzeugkomponenten die Gesamtbilanz negativ.

Ein Blick auf die gemeinsamen Unsicherheiten zeigt, dass die ökologische Bilanz vom BEV und ICEV stark von der jeweiligen Region abhängt. Dabei spielen der Strommix, die verfügbaren Recyclingkapazitäten sowie die klimatischen Bedingungen eine wesentliche Rolle. Während BEVs besonders in Länder mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien profitieren, schneiden ICEVs in Region mit effizientem Kraftstoffmanagement besser ab.

Die Ergebnisse der LCA werden zudem stark von der Verfügbarkeit und Genauigkeit der verwendeten Daten beeinflusst. Durchschnittswerte, vereinfachte Annahmen oder etwas veraltete Informationen können die Aussagekraft der Analyse einschränken. Daher ist es wichtig, dass die Studien klar definierte Systemgrenzen setzen, etwa in Bezug auf Infrastruktur oder End-of-Life Prozesse, um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Auch die fortlaufenden Verbesserungen von Technologien und Materialien bei BEVs und ICEVs tragen zu den Unsicherheiten bei der Bewertung bei. Beispielsweise können Fortschritte in der Batterietechnologie (wie Festkörperbatterien) [71] oder die Entwicklung synthetischer Kraftstoffe (wie E-Fuels) die Ergebnisse zukünftiger Analysen grundlegend verändern [70]. Allerdings ist der Einfluss solcher Entwicklungen auf die Umweltbilanz derzeit schwer abzuschätzen.

Betrachtet man die Lebensdauer von Fahrzeugen, wird deutlich, dass diese sich oft über mehrere Jahrzehnte erstreckt. Gleichzeitig verändern sich in diesem Zeitraum Energiequellen, Infrastrukturen und Technologien erheblich. Da eine aktuelle Lebenszyklusanalyse jedoch nur den derzeitigen Stand der Technik und die Energieversorgung berücksichtigt, können zukünftige Entwicklungen, wie der Ausbau erneuerbarer Energien oder Fortschritte im Recycling, kaum in die Bewertung einfließen. Diese Einschränkungen erschweren somit eine langfristige und zuverlässige Beurteilung der Umweltbilanz.

Die Abbildung 21 zeigt eine übersichtliche Darstellung der Unsicherheiten in der Lebenszyklusanalyse beider Fahrzeugtypen. Sie veranschaulicht die Unsicherheiten in den genannten Bereichen.

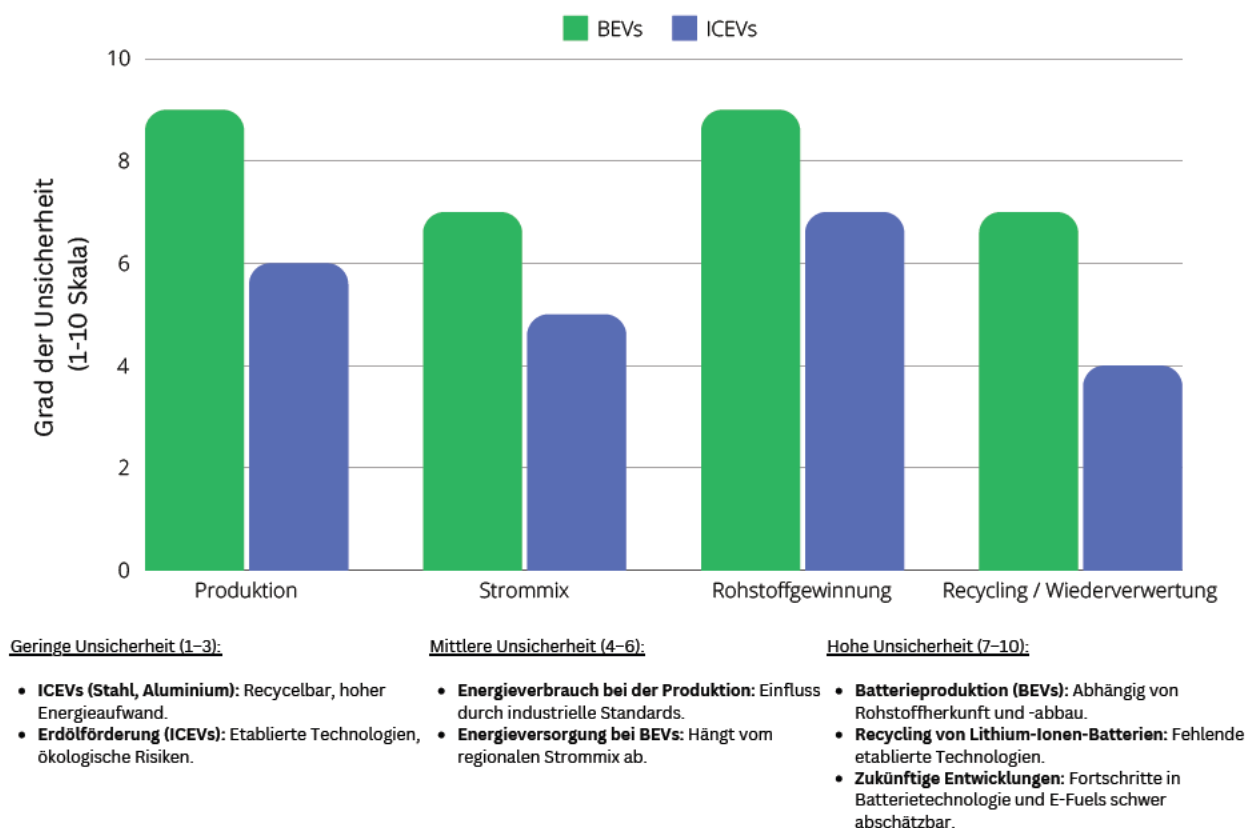


Abbildung 21: Visualisierung der Unsicherheiten

Die Abbildung 21 wurde in dieser Arbeit verwendet, um die Unsicherheiten der zuvor genannten Aspekte anschaulich darzustellen. Diese Darstellung ermöglicht es, eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den beiden Antriebstechnologien zu schaffen.

Die Balken in der Abbildung 21 visualisieren die Unsicherheiten in den Bereichen Produktion, Strommix, Rohstoffgewinnung und Recycling / Wiederverwertung, wobei die Werte auf der Skala von 1 bis 10 eingeordnet sind. Hierbei werden die Unsicherheitsgrade in drei Kategorien unterteilt: geringe Unsicherheit (1-3), mittlere Unsicherheitsgrade (4-6) und hohe Unsicherheit (7-10). Diese klare Struktur erleichtert das Verständnis und hebt gleichzeitig die zentralen Herausforderungen hervor.

Besonders deutlich wird, dass Bereiche wie die Batterieproduktion und das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien bei BEVs mit hohen Unsicherheiten verbunden sind. Im Gegensatz dazu zeigen etablierte Technologien, wie die Erdölförderung für ICEVs, eine geringe Unsicherheit. Die Abbildung 21 unterstützt somit die Zielsetzung der Arbeit, um die Problemfelder beider Antriebstechnologien übersichtlich darzustellen und gegenüberzustellen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die gemeinsamen Unsicherheiten in der LCA von BEV und ICEV sich aus regionalen, technologischen und methodischen Faktoren ergeben. Sie erschweren nicht nur den direkten Vergleich beider Fahrzeugtypen, sondern zeigen auch, wie stark die Umweltbilanz von zukünftigen Entwicklungen und regionalen Gegebenheiten abhängt. Eine regelmäßige Aktualisierung von Daten und Annahmen sowie ein umfassender Blick auf den gesamten Lebenszyklus sind entscheidend, um diese Unsicherheiten zu minimieren.

6 Fazit und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse

In diesem Kapitel wird das bisher Gesagte unter der zugrundeliegenden Analyse der Lebenszyklen und der Nachhaltigkeitsbewertung zusammengeführt und miteinander verbunden, um die zentralen Ergebnisse darzustellen.

Die Arbeit widmete sich der Forschung der Nachhaltigkeitsbewertung von Antriebstechnologien, insbesondere im Vergleich zwischen batteriebetriebenen Fahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Sie analysierte die Umweltauswirkungen der beiden Fahrzeugtypen über ihren gesamten Lebenszyklus, einschließlich CO₂-Emissionen, Ressourcenverbrauch und Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe. Ziel war es eine fundierte Grundlage für die Beurteilung nachhaltiger Mobilitätsstrategien zu schaffen und zu einer Entscheidungsfindung in diesem Bereich beizutragen. Da sowohl die Elektromobilität als auch konventionelle Fahrzeuge in Bezug auf ihre Umweltbilanz bereits viel Aufmerksamkeit erfahren haben und derzeit weiterhin intensiv erforscht werden, konnten in forschungsspezifischer Hinsicht zahlreiche theoretische Beiträge berücksichtigt werden.

In Anbetracht dessen konnte eine gute theoretische Grundlage erfasst werden, die es ermöglichte, beide Fahrzeugtypen differenziert zu betrachten und zu vergleichen, um fundierte Erkenntnisse für nachhaltige Mobilitätsstrategien zu gewinnen. Im Hinblick auf die Beurteilung nachhaltiger Mobilitätsstrategien kann mit den vorliegenden Ergebnissen im Rahmen dieser Arbeit eine hinreichende Antwort gegeben werden.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass batterieelektrische Fahrzeuge langfristig die nachhaltigere Wahl darstellen, besonders wenn der Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. Im Kontext der Europäischen Union, die sich zukunftsorientierte Klimaziele gesetzt hat, bieten BEVs ein erhebliches Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Während die Produktion von BEVs aufgrund der Batterieherstellung ressourcenintensiver ist, wird dies durch eine saubere Nutzung, insbesondere bei grünem Strom aus den in der EU zunehmend ausgebauten erneuerbaren Energiequellen, ausgeglichen. Die CO₂-Emissionen der BEVs während

ihrer Nutzung sind erheblich niedriger als die der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, deren CO₂-Bilanz über den gesamten Lebenszyklus durchgehend negativ bleibt.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass ICEVs durch den kontinuierlichen Verbrauch fossiler Brennstoffe ressourcenintensiver bleiben und in der Gesamtbetrachtung eine schlechtere CO₂-Bilanz aufweisen. BEVs hingegen haben in Regionen der EU, die über einen emissionsarmen Energiemix verfügen, ein noch höheres Potenzial für eine positive CO₂-Bilanz. Die EU verfolgt zudem eine klare Strategie zur Förderung der Elektromobilität, etwa durch den Ausbau von Ladeinfrastruktur und gesetzliche Regelungen zur Reduzierung von Emissionen, was den Übergang zu BEVs unterstützt.

Zusätzlich zeigen die Ergebnisse das Unsicherheiten im Lebenszyklusansatz der BEVs und ICEVs durch regionale, technologische und methodische Faktoren bedingt sind. Diese erschweren nicht nur den direkten Vergleich der beiden Fahrzeugtypen, sondern unterstreichen auch, wie stark die Umweltbilanz von zukünftigen Entwicklungen und regionalen Gegebenheiten abhängt. Für die EU ist es daher entscheidend, eine nachhaltige und zukunftsfähige Strategie zu entwickeln, die auf den ständigen Fortschritt von Technologien und die Verbesserung der Produktionsprozesse abzielt. Eine kontinuierliche Aktualisierung von Daten und Annahmen sowie eine umfassende Betrachtung des gesamten Lebenszyklus sind notwendig, um diese Unsicherheiten zu minimieren und die EU-Klimaziele im Bereich der Mobilität zu erreichen.

Abschließend kann noch hinzugefügt werden, dass sich im Verlauf dieser Arbeit herausgestellt hat, wie wichtig eine umfassende Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Fahrzeugtechnologien ist, um fundierte Aussagen über ihre Nachhaltigkeit treffen zu können. Es ist zudem von entscheidender Bedeutung, regelmäßig aktualisierte Daten zu verwenden, da sich technologische Entwicklungen und der Energiemix stetig verändern. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Analyse auf dem neuesten Stand bleibt und nicht auf veraltete Informationen basiert.

6.2 Handlungsempfehlungen für zukünftige Mobilitätsstrategien

Auf Basis der LCA-Ergebnisse und der Nachhaltigkeitsbewertung ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen, um Mobilitätsstrategien langfristig umweltfreundlicher und nachhaltiger zu gestalten.

Die Förderung batterieelektrischer Fahrzeuge sollte durch einen flächendeckenden Ausbau der Ladeinfrastruktur begleitet werden. Besonders wichtig ist dabei der Einsatz erneuerbarer Energien im Strommix, um die CO₂-Bilanz in der Nutzungsphase zu optimieren. Zusätzlich sollten öffentliche und private Fahrzeugtransporte konsequent elektrifiziert werden, da sie ein großes Potenzial zur schnellen Reduzierung von Emissionen bieten.

Um die ökologische Bilanz von BEVs weiter zu verbessern, sind Fortschritte in der Batterieproduktion wichtig. Investitionen in Forschung und Entwicklung alternativer Batterietechnologie – wie beispielsweise Festkörperbatterien – sowie mehr Einsatz recycelter Materialien können den ressourcenverbrauch erheblich reduzieren. Gleichzeitig müssen Recyclingkapazitäten für Batterien ausgebaut und effiziente Rückgewinnungssysteme etabliert werden, um die Rohstoffe wie Lithium und Kobalt nachhaltig zu nutzen.

Die Integration unterschiedlicher Verkehrsmittel in vernetzten Systemen ist ein zentraler und wichtiger Baustein für eine nachhaltige Mobilität. Die Kombination aus BEVs, öffentlichen Verkehrsmitteln, Carsharing und Mikromobilität – wie beispielsweise E-Bikes – sind Alternativen zum klassischen Individualverkehr. Gleichzeitig ist der Ausbau und die Elektrifizierung des öffentlichen Nahverkehrs notwendig, um emissionsarme Mobilitätsoptionen für die Bevölkerung bereitzustellen [72]. Kleinere und leichtere BEVs, die weniger Ressourcen verbrauchen, sollten stärker gefördert werden. Auch Mikromobilitätslösungen können einen wichtigen Beitrag zur Reduktion des Energieverbrauchs leisten. Insbesondere dann, wenn es um Kurzstrecken geht. [73, S.144f.]

Durch die Förderung von Home-Office, digitalen Dienstleistungen und virtuellen Meetings kann der Pendelverkehr reduziert werden. Das ist ebenfalls ein Punkt, der in Betracht gezogen werden muss [74, S.10ff.]. Ein weiterer Punkt ist die Aufklärung. Verbraucher sollten über die Vorteile von BEVs und umweltfreundlicher Mobilität aufgeklärt werden. Die Aufklärung kann beispielsweise durch Kampagnen laufen. Ohne die Einbindung und die Aufklärung der Verbraucher kann keine erfolgreiche Transformation stattfinden. Um den Umstieg auf nachhaltige Mobilitätsformen zu beschleunigen, sollten zusätzlich

finanzielle Anreize wie Kaufprämien, Steuervergünstigungen und Rabatte für die Nutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln gegeben werden.

Um globale Herausforderungen wie die Rohstoffversorgung für Batterien zu bewältigen, sind internationale Kooperationen erforderlich. Strengere Emissionsvorgaben und nachhaltige Lieferketten sind notwendig, um die Klimaziele zu erreichen und soziale sowie ökologische Standards zu sichern und das nicht nur Europa weit, sondern weltweit.

Eine nachhaltige Mobilität der Zukunft basiert auf der Elektrifizierung des Verkehrs, der Förderung erneuerbare Energien und der Verknüpfung unterschiedlicher Verkehrsmittel. Ergänzt durch eine nachhaltige Ressourcenstrategie und eine stärkere Verbraucherorientierung. Somit können die ökologischen Vorteile maximiert und die Klimaziele effektiv erreicht werden.

Abbildung 22 stellt die gegenseitigen Abhängigkeiten und Verbindungen zwischen den Handlungsempfehlungen dar. Weiterhin ist zu sehen, dass alle genannten Punkte miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig ergänzen. Jede Maßnahme beeinflusst die andere und trägt zum Gesamterfolg der Mobilitätsstrategie bei.

Abschließend kann festgehalten werden, dass eine nachhaltige Mobilität eine Kombination aus technologischen, wirtschaftlichen und verkehrspolitischen Maßnahmen erfordert. Die nachhaltige Batterieproduktion und -entsorgung sowie die Förderung energieeffizienter Fahrzeuge sind zentrale Schritte zur Reduzierung der Umweltbelastung. Der Ausbau der Elektromobilität erfordert bessere Infrastruktur, internationale Zusammenarbeit und finanzielle Anreize. Ergänzend fördern multimodale Mobilitätskonzepte eine effizientere Nutzung verschiedener Verkehrsmittel, während die Reduktion des Pendelverkehrs durch Homeoffice weiter gesenkt wird. Diese Maßnahmen bilden gemeinsam eine nachhaltige Mobilitätsstrategie.

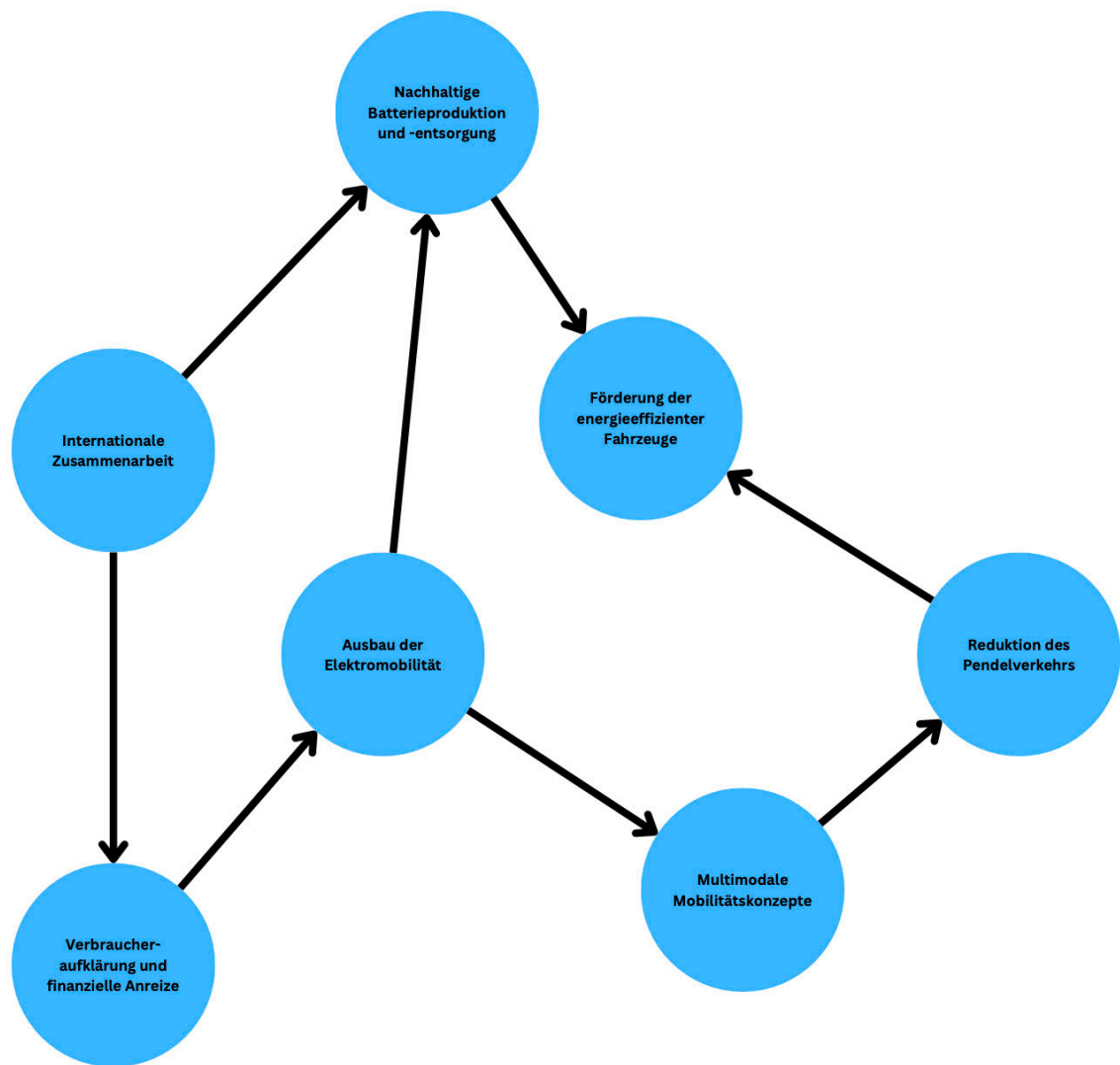


Abbildung 22: Zusammenhänge der Handlungsempfehlungen für nachhaltige Mobilitätsstrategien

7 Literaturverzeichnis

- [1] EnBW Energie Baden-Württemberg AG (2024): Vom ersten E-Auto bis heute: Die Geschichte des Elektroautos. Zugriff am 09.Dezember.2024, von <https://www.enbw.com/blog/elektromobilitaet/fahren/die-geschichte-des-elektroautos/>
- [2] Fritz, D.; Heinfellner, H.; Lambert, S. (2021): DIE ÖKOBILANZ VON PERSONENKRAFTWAGEN Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO₂-Reduktionspotential und Energieeinsparung. Umweltbundesamt GmbH, Wien, S. 6.
- [3] EnBW Energie Baden-Württemberg AG (2024): CO₂-Bilanz: Wie umweltfreundlich sind Elektroautos?. Zugriff am 09.Dezember.2024, von <https://www.enbw.com/blog/elektromobilitaet/trends/co2-bilanz-wie-umweltfreundlich-sind-elektroautos/>
- [4] Thielmann, A.; et al (2020): Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf: Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft?. FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI, Karlsruhe, S. 12 ff.
- [5] A. Kamper, D. Vallee, A. Schnettler (2018): Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Springer Verlag, Berlin, S. 15.
- [6] Über 100 Jahre Automobil – Woher kommen wir, wohin fahren wir?. Zugriff am 18.Dezember.2024, von https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527326480_c01.pdf
- [7] Merker, M.; Teichmann, R. (2018): Grundlagen Verbrennungsmotoren Funktionsweise und alternative Antriebssysteme Verbrennung, Messtechnik und Simulation. Springer Verlag, Wiesbaden, S. 694
- [8] o. V. (2022): ELEKTROMOBILITÄT – KURZ ERKLÄRT Die Zeit ist reif für Elektromobilität!. ElektroMobilität NRW, NRW, S. 10 – 13
- [9] AAMPACT e.V. (o.J.): mein Autolexikon.de: Antrieb. Zugriff am 18.Dezember.2024, von <https://www.mein-autolexikon.de/autolexikon/hybrid/produktgruppen/antrieb-bev.html>

[10] Peter Pözlbauer, MA (2024): Rekuperation bei Elektroautos: Funktionsweise, Vorteile und Herausforderungen. Zugriff am 18.Dezember.2024, von <https://www.alternativantriebe.com/rekuperation-bei-elektroautos-funktionsweise-vorteile-und-herausforderungen>

[11] Schaeffler AG (2022): Effizientes integriertes Thermomanagement für batterieelektrische Fahrzeuge mit hoher Reichweite. Zugriff am 18.Dezember.2024, von <https://www.schaeffler.com/de/medien/messen-veranstaltungen/kolloquium/digitaler-tagungsband-2022/thermomanagement-batterieelektrische-fahrzeuge/>

[12] EnBW Energie Baden-Württemberg AG (2024): Elektroautos: Vorteile und Nachteile im Überblick. Zugriff am 18.Dezember.2024, von <https://www.enbw.com/blog/elektromobilitaet/fahren/elektroautos-vorteile-und-nachteile-im-ueberblick/>

[13] AutoScout24 GmbH (2021): So funktioniert der Verbrennungsmotor: Die Technik anschaulich erklärt. Zugriff am 22.Dezember.2024, von <https://www.autoscout24.de/informieren/ratgeber/kfz-technik/verbrennungsmotor-die-technik-anschaulich-erklart/>

[14] simpleclub GmbH (o. J.): Abgasanlage. Zugriff am 22.Dezember.2024, von <https://simpleclub.com/lessons/kfz-mechatronikerin-abgasanlage>

[15] Grohe, H.; Russ, G. (2014): Otto- und Dieselmotoren. Vogel Communications Group Verlag, Würzburg

[16] ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (2024): Nachhaltigkeitsbewertung. Zugriff am 27.Dezember.2024, von <https://www.ifeu.de/methoden-tools/nachhaltigkeitsbewertung>

[17] Haufe-Lexware GmbH & Co. KG (o. J.): Konzept und Definition: Die drei Säulen der Nachhaltigkeit. Zugriff am 27.Dezember.2024, von <https://www.haufe.de/corporate-sustainability/drei-saulen-modell?akttyp=organische%20suche&med=google&aktnr=84834&wnr=04393672>

- [18] Gediga, J. (2018): Life Cycle Assessment. In W. Bleck & E. Möller (Hrsg.), Handbuch Stahl. Auswahl, Verarbeitung, Anwendung, Hanser Verlag.
- [19] DIN EN ISO 14040 (2006): Deutsches Institut für Normung e. V., Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin. Zugriff am 08.Februar.2025, von https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/3_Werkzeuge/a_Basis-Werkzeuge/i_Leitfaden_Ressourceneffizienz/OEkobilanz_DIN_EN_ISO_14040.pdf
- [20] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024): Direkt und indirekt – versteckte Energie und Emissionen. Zugriff am 04.Januar.2025, von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Glossar/direkt-indirekt-energie-emissionen.html>
- [21] Der Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft (iwd) (2024): Kobalt wird zum kritischen Rohstoff. Zugriff am 04.Januar.2025, von <https://www.iwd.de/artikel/kobalt-wird-zum-kritischen-rohstoff-635839/>
- [22] Helms, H. und co. (2016): Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Im Auftrag des Bundesamtes. Endbericht. Zugriff am 04.Januar.2025, Von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf
- [23] Fritz, D.; Heinfellner, H.; Lambert, S. (2023): ROHSTOFFE DER ELEKTROMOBILITÄT, Umweltbundesamt GmbH, Wien.
- [24] Umweltbundesamt (2024): CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom 2023 gesunken. Zugriff am 12.Januar.2025, von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-2023>

[25] Sandbag (Ember). (31. Januar, 2025). Entwicklung des Emissionsfaktors der Stromerzeugung in Deutschland und Frankreich im Zeitraum 2000 bis 2024 (in g CO₂-Äquivalent pro Kilowattstunde Strom) [Graph]. In Statista. Zugriff am 08. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1421117/umfrage/emissionen-strom-deutschland-und-frankreich/>

[26] ENTEGA Plus GmbH (2023): ELEKTOAUTO: VERBRAUCH UND KOSTEN AUF 100 KM. Zugriff am 12. Januar 2025, von <https://www.entega.de/blog/elektroauto-verbrauch/#:~:text=Der%20durchschnittliche%20Verbrauch%20auf%20100,30%20Prozent%20%C3%BCber%20den%20Herstellerangaben>

[27] Fraunhofer ISE. (15. Januar, 2025). Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in Norwegen in den Jahren von 2022 bis 2024 [Graph]. In Statista. Zugriff am 08. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1292636/umfrage/struktur-der-stromerzeugung-in-norwegen/>

[28] Ember. (July 3, 2024). Electricity generation emission intensity in selected countries worldwide in 2023 (in grams of carbon dioxide per kilowatt-hour) [Graph]. In Statista. Retrieved February 08, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/943137/global-emissions-intensity-power-sector-by-country/>

[29] Ember. (February 7, 2024). Distribution of electricity generation in Poland in 2023, by source [Graph]. In Statista. Retrieved February 08, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1236356/poland-distribution-of-electricity-production-by-source/>

[30] electricitymap.org. (December 13, 2024). Carbon Dioxide (CO₂) emissions to the electricity produced in the Central and Eastern European countries between 2020 and 2024 (in grams of CO₂ equivalent per kilowatt-hour of electricity produced) [Graph]. In Statista. Retrieved February 08, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1083967/cee-carbon-dioxide-co2-emissions-of-the-energy-sector/>

[31] VDI. (13. Dezember, 2023). Anteile einzelner Bauteile an den verursachten Treibhausgasemissionen bei der Produktion eines BEV-Antriebsstrangs [Graph]. In

Statista. Zugriff am 08. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1445484/umfrage/emissionen-bei-der-produktion-von-e-auto-antriebsstrang/>

[32] Fraunhofer ISE. (3. Januar, 2025). Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in der EU in den Jahren von 2022 bis 2024 [Graph]. In Statista. Zugriff am 08. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/182159/umfrage/struktur-der-bruttostromerzeugung-in-der-eu-27/>

[33] Agora Verkehrswende. (1. Mai, 2019). Zusammensetzung der Treibhausgas-Emissionen in der Herstellung von Batterien für Elektroautos nach Bestandteilen/Fertigungsschritten (in kg CO₂-Äquivalenten pro kWh der Batterie; Stand: 2019) [Graph]. In Statista. Zugriff am 08. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1074324/umfrage/zusammensetzung-der-co2-emissionen-bei-der-herstellung-von-e-autobatterien/>

[34] Northvolt. (July 3, 2024). Projected carbon footprint of Northvolt battery cells in 2023, with a target for 2030 (in kilograms of carbon dioxide equivalent per kilowatt-hour) [Graph]. In Statista. Retrieved February 08, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1495871/northvolt-battery-cell-carbon-footprint/>

[35] Wietschel, M et al (2019): Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

[36] US Geological Survey. (31. Januar, 2024). Anteile ausgewählter Länder an der weltweiten Produktion von Kobalt im Jahr 2023 [Graph]. In Statista. Zugriff am 08. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1369081/umfrage/verteilung-der-weltweiten-foerderung-von-gallium-nach-laendern/>

[37] Tröster, B.; Staritz, C.; Wojewska, A. (2023): KRITISCHE ROHSTOFFE GEFRAGTES LITHIUM: EIN SEKTOR ZWISCHEN NACHHALTIGKEIT UND SPEKULATION, Kammer für Arbeiter und Angestellte für Wien, Wien.

[38] European Commission (o.J.): Critical raw materials. Zugriff am 18.Januar.2025, von https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en?prefLang=de

[39] Sangadji, A.; Ngoyo, M.; Ginting, P.; (o.J): Road to Ruin: Wie nachhaltig ist die Nickel Produktion für Elektroauto-Akkus?, Rosa-Luxemburg-Stiftung, Quezon City. Zugriff am 10.Februar.2025, von https://www.rosalux.de/fileadmin/rls_uploads/pdfs/engl/Nickel_Study_FINAL.pdf

[40] Europäischer Rat (2024): „Fit für 55“. Zugriff am 18.Januar.2025, von <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/fit-for-55/>

[41] Umweltbundesamt (2024): Klimaschutz- und Energiepolitik in der EU, Zugriff am 18.Januar.2025, von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-der-eu>

[42] Neef, C.; Schmaltz, T.; Thielmann, A.; (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.

[43] Avenenergy Suisse (o.J.): E-Mobilität: Batterieproduktion belastet Umwelt. Zugriff am 18.Januar.2025, von <https://avenergy.ch/de/resultat/2-news/423-e-mobilitaet-batterieproduktion-belastet-umwelt>

[44] Energie-Experten (2024): Wie stark belastet die Batterieherstellung die Ökobilanz von Elektroautos?. Zugriff am 18.Januar.2025, von <https://www.energie-experten.ch/de/mobilitaet/detail/wie-stark-belastet-die-batterieherstellung-die-oekobilanz-von-elektroautos.html>

[45] Andreas Pabst (2023): Der ‚Critical Raw Materials Act‘. Was bedeutet das für die EU und warum COFERMIN optimistisch ist. COFERMIN Rohstoffe GmbH & Co. KG. Zugriff am 18.Januar.2025, von <https://cofermin.de/der-critical-raw-materials-act/>

[46] European Commission (o.J): Policy and strategy for raw materials. Zugriff am 18.Januar.2025, von https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/policy-and-strategy-raw-materials_en

- [47] Bruckberger, H (2020): Woraus besteht eigentlich ein Auto?. Zugriff am 20.Januar.2025, von <https://www.automotive.at/automotive/woraus-besteht-eigentlich-ein-auto-45022>
- [48] Scholle. K. Statista GmbH. (10. Dezember, 2024). Statistiken zur thyssenkrupp AG Zugriff am 08. Februar 2025, von <https://de.statista.com/themen/1106/thyssenkrupp/>
- [49] IAI. (January 25, 2023). Greenhouse Gas (GHG) emissions of the global aluminum sector from 2019 to 2021, by process (in million tonnes of CO₂) [Graph]. In Statista. Retrieved February 08, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1114510/aluminum-sector-global-ghg-emissions-by-process/>
- [50] Sibanye-Stillwater. (November 1, 2023). Distribution of palladium demand worldwide in 2022, by industry [Graph]. In Statista. Retrieved February 08, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1421333/palladium-demand-share-worldwide-by-industry/>
- [51] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LFU), Referat 23: Biologische Umweltbeobachtung. (2003). Anreicherung von Platingruppenelementen aus Kfz-Abgaskatalysatoren im straßennahen Ökosystem. Zugriff am 20.Januar.2025, von https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/82209-Zusammenfassende_Darstellung.pdf
- [52] IEA. (June 5, 2024). Lifecycle emissions of combustion and electric vehicles worldwide under a Stated Policies Scenario from 2024 to 2038, by stage (in metric tons of carbon dioxide equivalent) [Graph]. In Statista. Retrieved February 08, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1400381/lifecycle-emissions-of-combustion-and-electric-vehicles-worldwide-by-stage/>
- [53] KBA. (23. Mai, 2024). Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland von 2013 bis 2023 (Verbrauch auf 100 Kilometer) [Graph]. In Statista. Zugriff am 08. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/185831/umfrage/kraftstoffverbrauch-von-neuzugelassenen-pkw-in-deutschland/>

- [54] IM Marketplace GmbH (o.J.): Nutzungsdauer Pkw: Die durchschnittliche Lebensdauer von Autos. Zugriff am 25.Januar.2025, von <https://www.instamotion.com/blog/nutzungsdauer-pkw>
- [55] KBA. (23. Mai, 2024). Kraftstoffverbrauch der neu zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland nach Segmenten im Jahr 2023 (in l/100 km) [Graph]. In Statista. Zugriff am 08. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1467865/umfrage/pkw-neuzulassungen-segmente-kraftstoffverbrauch/>
- [56] Deutscher Bundestag (2019): Dokumentation: CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich, Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestags. Zugriff am 25.Januar.2025, von <https://www.bundestag.de/resource/blob/660794/dfdee26b00e44b018b04a187f0c6843e/WD-8-056-19-pdf-data.pdf>
- [57] Masternaut GmbH handelnd als MICHELIN Connected Fleet (2024): So berechnen Sie den CO₂-Abdruck Ihrer Flotte. Zugriff am 25.Januar.2025, von https://connectedfleet.michelin.com/de/blog/so-berechnen-sie-den-co2-abdruck-ihrer-flotte/#:~:text=Jedes%20Fahrzeug%20f%C3%A4hrt%20monatlich%202500,668*100%3D66%2C800
- [58] Umweltbundesamt (2016): Grenzwerte für Schadstoffemissionen von PKW. Zugriff am 25.Januar.2025, von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/tabelle_grenzwerte_fuer_schadstoffemissionen_von_pkw.pdf
- [59] Motor Presse Stuttgart GmbH & Co.KG (2019): Breites Angebot an Benzinern und Dieseln. Zugriff am 25.Januar.2025, von <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/alle-bmw-modelle-mit-euro-6d-temp/>
- [60] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) (2024): Euro 6d und Euro 6e: Alle Infos zu den Abgasnormen. Zugriff am 25.Januar.2025, von <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/neuwagenkauf/euro-6d-6e/#rde-messungen-kontrollieren-laborwerte>

[61] Suhr, I; Kessler, G (2016): DIESEL: DAS PROBLEM Wie Dieselmotoren die Luft in deutschen Städten ruinieren. Greenpeace e.V. Berlin. Zugriff am 25.Januar.2025, von https://www.greenpeace.de/publikationen/20160216_greenpeace_factsheet_diesel_problem_0.pdf

[62] Wissenschaftlicher Dienst des Europäischen Parlaments (o.J.): Modell der Kreislaufwirtschaft: weniger Rohstoffe, weniger Abfall, weniger Emissionen. Zugriff am 18.Januar.2025, von https://www.europarl.europa.eu/resources/library/images/20240930PHT24356/20240930PHT24356_original.png

[63] wissenschaft.de (2022): Aus welchen Teilen besteht ein Auto?. Zugriff am 28.Januar.2025, von <https://www.wissenschaft.de/technik-digitales/aus-welchen-teilen-besteht-ein-auto/>

[64] Umweltbundesamt (2024): Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib. Zugriff am 28.Januar.2025, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#altfahrzeuge-2021-niedrigste-anzahl-seit-beginn-der-aufzeichnungen-in-2004>

[65] John.J, (2024): Wie sich Materialkreisläufe bei Autos schließen lassen. Zugriff am 28.Januar.2025, von <https://www.covestro.com/blog/de/wie-sich-materialkreislaeufe-bei-autos-schliessen-lassen/>

[66] Europäische Kommission (2023): Kreislaufwirtschaft: EU-Kommission legt eine Verordnung für Recycling von Fahrzeugen vor. Zugriff am 28.Januar.2025, von https://germany.representation.ec.europa.eu/news/kreislaufwirtschaft-eu-kommission-legt-eine-verordnung-fur-recycling-von-fahrzeugen-vor-2023-07-13_de#main-content

[67] Europäisches Parlament (2024): Wie will die EU bis 2050 eine Kreislaufwirtschaft erreichen?. Zugriff am 28.Januar.2025, von <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20210128STO96607/wie-will-die-eu-bis-2050-eine-kreislaufwirtschaft-erreichen>

[68] Schmitz, R.; Zylka, J.; Weber, F.; (2024): METALLE IM KREISLAUF, Verband Deutscher Metallhändler und Recycler e.V. (VDM), Berlin. Zugriff am 28.Januar.2025, von https://www.vdm.berlin/wp-content/uploads/2024/04/711-VDM_Magazin_Nr-711_Blei_RZ.pdf

[69] Metz, B.; Fischer, T.; (2024): EU-Fahrzeugverordnung: Deutsche Umwelthilfe fordert mehr Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschutz in der Autoindustrie, Deutsche Umwelthilfe. Zugriff am 28.Januar.2025, von <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/eu-fahrzeugverordnung-deutsche-umwelthilfe-fordert-mehr-kreislaufwirtschaft-und-ressourcenschutz-in/>

[70] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2023): Bundesminister Wissing zu Flottengrenzwerten und E-Fuels. Zugriff am 11.Februar.2025, von <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2023/029-wissing-flottengrenzwerte-und-e-fuels.html>

[71] Bardenhagen, I.; Langer, F.; (o.J.): Festkörperbatterien für die Elektromobilität, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Bremen. Zugriff am 11.Februar.2025, von <https://www.ifam.fraunhofer.de/de/magazin/festkoerperbatterien-fuer-die-elektromobilitaet.html>

[72] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2021): Mit der Elektrobahn klimaschonend in die Zukunft – Das Bahn-Elektrifizierungsprogramm des Bundes. Zugriff am 19.Februar.2025, von <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/elektrobahn-klimaschonend-zukunft-bahn-elektrifizierungsprogramm.html>

[73] Kruse, A.; Heinfellner, H.; Gusig, L. (2024): Nachhaltige Mobilitätslösungen: Fahrzeuge, Antriebe, kommunale Perspektiven, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.

[74] Kimpeler, S.; Erdman, L. (2023): VORAUSSCHAU FÜR DEN KLIMASCHUTZ: Mobile Arbeit in der Zukunft - Klimaschutzbezogene Chancen und Risiken, Umweltbundesamt GmbH, Dessau-Roßlau. Zugriff am 19. Februar 2025, von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_mobile_arbeit_in_der_zukunft.pdf

[75] ADAC. (5. Februar, 2025). Durchschnittlicher Preis für den Kraftstoff Super E10 in Deutschland vom 7. Januar 2014 bis zum 4. Februar 2025 (in Eurocent pro Liter) [Graph]. In Statista. Zugriff am 10. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/224101/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-e10/>

[76] ACEA. (21. Januar, 2025). Anzahl der Neuzulassungen von Personenkraftwagen in der Europäischen Union nach ausgewählten Antrieben in den Jahren 2014 bis 2024 [Graph]. In Statista. Zugriff am 19. Februar 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1251950/umfrage/pkw-neuzulassungen-in-der-eu-nach-antrieb/>

[77] Franke, M., Rieger, T., Hofmann, A. et al. (26. Juli, 2024). Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen – Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen. Österr Wasser- und Abfallw 76, 403–410 (2024). Zugriff am 18. Februar 2025, von <https://doi.org/10.1007/s00506-024-01062-3>



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Yavasca

Vorname: Deniz

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Nachhaltigkeitsbewertung batterieelektrischer Fahrzeuge im Vergleich zu Verbrennungsmotorfahrzeugen

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

28.02.2025

Datum

Unterschrift im Original