

Bachelorarbeit

Analyse des Energieverbrauchs von Elektro- und
Verbrennungsfahrzeugen unter Verwendung von ISO
23795-1:2022

zur Erlangung des akademischen Grades
'Bachelor of Science' B.Sc.
im Studiengang Informatik

vorgelegt dem Fachbereich
Informatik und Wirtschaftsinformatik
der
Provadis School of International Management and Technology
von

Marius Lieb

D343

marius.lieb@stud-provadis-hochschule.de

Tannenbühlweg 2, D-89257 Illertissen

Erstgutachter: Dr. Houssam Jedidi

Zweitgutachter: Dr. ABC

Betreuung: Dr. Jedidi

Ende der Bearbeitungsfrist: 15.03.2024

Frankfurt am Main, im Juli 2024

Sperrvermerk

Diese Arbeit darf Dritten, mit Ausnahme der betreuenden Dozenten und befugten Mitgliedern der Verwaltung der Proবাদis Hochschule, sowie Beschäftigten der Deutschen Telekom AG, ohne ausdrückliche Zustimmung der Deutschen Telekom AG nicht zugänglich gemacht werden. In begründeten Verdachtsfällen dürfen die Arbeit oder Teile davon von der Proবাদis Hochschule einer Plagiatsprüfung durch einen Plagiatssoftware-Anbieter unterzogen werden und auf dort eingerichteten Proবাদis Hochschul-spezifischen Datenbanken temporär gespeichert werden. Der Sperrvermerk ist im Fall einer Plagiatsprüfung nicht wirksam.

Eine Vervielfältigung und Veröffentlichung der Arbeit ohne ausdrückliche Genehmigung durch die Deutsche Telekom AG - auch in Auszügen - ist nicht erlaubt.

Marius Lieb

Ulm, den 10.07.2024

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energy Performance Index zwischen Golf und Mokka.	16
Abbildung 2: Acceleration Performance Index zwischen Golf und Mokka.	17
Abbildung 3: Vergleich des Energieverbrauchs beider Fahrzeugtypen	19
Abbildung 4: Diagnoseplots des Regressionsmodells	21
Abbildung 5: A curious figure.	24

Glossar

Data Science – Interdisziplinäres Feld, das Methoden aus Mathematik, Statistik und Informatik nutzt, um Wissen und Erkenntnisse aus großen Datenmengen zu gewinnen. 9

Haus – Besteht aus 4 Wänden und einem Dach. 23

Abkürzungsverzeichnis

EVs – Elektrofahrzeuge. 1, 3

ICEs – Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. 1, 3

LCMM – Low Carbon Mobility Management. 1, 9

OIDC – Open ID Connect. 22

TSI – T-Systems International GmbH. 1

WLTP – Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure. 1

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ii
Glossar	iii
Abkürzungsverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
1.1 Kontext und Bedeutung des Themas	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	1
1.3 Praxisfall der Arbeit	1
1.4 Forschungsfrage und Hypothesen	2
1.5 Aufbau der Arbeit	2
2 Theoretischer Hintergrund	3
2.1 Grundlagen zu Elektro- und Verbrennerfahrzeugen	3
2.1.1 Elektrofahrzeuge	3
2.1.2 Verbrennungsmotorfahrzeuge	3
2.1.3 Zusammenfassung	3
2.2 ISO 23795-1:2022	4
2.2.1 Kernmerkmale des Standards	4
2.2.2 Anwendung und Nutzen	5
2.2.3 Physikalische Grundlagen	5
2.3 WLTP-Standard	7
2.3.1 Vorteile	7
2.3.2 Kritik	7
3 Methodik	9
3.1 Datenerhebung (Aufzeichnungen, Testbedingungen, Fahrerverhalten)	9
3.1.1 Testfahrzeuge	9
3.1.2 Mobile Datenaufzeichnung	9
3.1.3 Standardisierung der Testbedingungen	11
3.2 Analysemethodik	12
4 Datenanalyse	14
4.1 Datenaggregation und -vorverarbeitung	14
4.2 Analyse von Key Performance Indicators	14
4.2.1 Berechnung des Energy Performance Index (EPI):	14
4.2.2 R Skript	15
4.2.3 Darstellung der Ergebnisse	15
4.3 Regressionsanalyse	18
4.3.1 Deskriptive Statistiken	19

4.3.2 Visualisierung des Energieverbrauchs	19
4.3.3 Regressionsanalyse	20
4.3.4 Schlussfolgerungen	21
4.4 Statistische Methoden	22
4.5 Vergleich mit WLTP-Werten	22
4.6 Verwendete Software und Tools	22
5 Ergebnisse	22
5.1 Darstellung der analysierten Fahrzeugdaten	22
5.2 Analyse der Energieeffizienz beider Fahrzeugtypen	22
5.3 Vergleich der Realwerte mit WLTP und Diskussion von Abweichungen	22
5.4 „Diskussion“ zu CO ₂ -Emissionen	22
6 Diskussion	22
6.1 Interpretation der Ergebnisse	22
6.2 Limitation der Methodik	22
6.3 Einordnung in bestehende Forschung	22
6.4 Implikation für den Praxisfall	22
6.5 Selbstkritik und Limitationen der Arbeit	22
7 Fazit und Ausblick	22
7.1 Zusammenfassung der zentralen Erkenntnisse	22
7.2 Praktische Implikationen für Stakeholder	22
7.3 Vorschläge für zukünftige Forschungen	22
8 Kein Teil	22
9 Einleitung	22
10 Grundlagen	24
10.1 Unterpunkt	24
10.2 Unterpunkt	25
10.2.1 Unter-Unterpunkt	25
10.2.2 Unter-Unterpunkt	25
10.3 Unterpunkt	26
10.3.1 Unter-Unterpunkt	26
11 Zusammenfassung	26
Bibliographie	I
KI-Verzeichnis	II
 Anhang	
A Wichtiger Anhang	III
B Weiterer Wichtiger Anhang	III

1 Einleitung

1.1 Kontext und Bedeutung des Themas

Der Klimawandel stellt eine der drängendsten globalen Herausforderungen dar, und die Transformation der Mobilitätsbranche ist entscheidend, um den ökologischen Fußabdruck signifikant zu reduzieren. Der Wechsel von ICEs (*Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor*) zu EVs (*Elektrofahrzeuge*) kennzeichnet einen Paradigmenwechsel, der sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Perspektive zunehmend wichtig wird.

In 2023 waren fast 25% der neuen Fahrzeuganmeldungen in Europa Elektrofahrzeuge, was den anhaltenden Trend zur nachhaltigeren Mobilität verdeutlicht. Diese Entwicklung wird durch zahlreiche politische Maßnahmen unterstützt, die von Steuervergünstigungen bis hin zur Förderung der Infrastrukturentwicklung reichen, um die Verbreitung von Elektrofahrzeugen weiter zu fördern (Global EV Outlook 2023 – Analysis - IEA, 2023).

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Diese Bachelorarbeit verfolgt das Ziel, durch detaillierte Analyse von Vergleichsfahrten die Effizienz und Nachhaltigkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren zu untersuchen, standardisiert nach der ISO 23795-1:2022 Norm. Dabei wird insbesondere die Genauigkeit und Praxisnähe von Verbrauchsnormen wie dem WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*) bewertet, um eine präzisere Einschätzung des realen Energieverbrauchs zu ermöglichen (International Organization for Standardization, 2022).

1.3 Praxisfall der Arbeit

Ein wesentlicher Aspekt dieser Arbeit ist die praktische Anwendung des Produkts LCMM (*Low Carbon Mobility Management*) von TSI (*T-Systems International GmbH*). LCMM unterstützt die Aggregation und Analyse von Fahrdaten gemäß der ISO 23795-1:2022 Norm und ermöglicht eine effiziente Überwachung und Verwaltung von Fahrzeugflotten in Bezug auf Energieverbrauch und CO₂-Emissionen. Durch die Nutzung von LCMM können Kunden nicht nur die Effizienz ihrer Flotten verbessern, sondern auch signifikante Einsparungen bei den Betriebskosten erzielen und zur Reduktion von Umweltbelastungen beitragen (Willenbrock, 2016).

Ziel ist es, für LCMM eine solide wissenschaftliche Basis für die Weiterentwicklung in Bezug auf Integration von Elektrofahrzeugen zu bieten. Laut der von Willenbrock (2023) präsentierten Daten ermöglicht LCMM die Messung und Bewertung des Fahrverhaltens von Fahrzeugen und stellt ein Effizienzprofil basierend auf einem Algorithmus bereit, der als Grundlage für eine eigene ISO-Norm dienen wird. Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch

können durch individuelle Fahrempfehlungen direkt in der LCMM-App an den Fahrer beim Fahren gegeben werden („Öko-Fahrtraining“) oder anhand der mit LCMM aufgezeichneten Fahrten mithilfe der Web-App von der Disposition analysiert und damit Routen optimiert werden (Willenbrock, 2023).

1.4 Forschungsfrage und Hypothesen

Die Forschungsfragen, die in dieser Arbeit behandelt werden, konzentrieren sich darauf, inwiefern sich Elektrofahrzeuge von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in ihrem Energieverbrauch unter realen Fahrbedingungen unterscheiden und wie diese Unterschiede im Vergleich zu den WLTP-Normwerten stehen. Daraus ergeben sich zwei zentrale Hypothesen:

- H1** Elektrofahrzeuge demonstrieren unter einer Vielzahl realer Fahrbedingungen eine erhöhte Energieeffizienz gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.
- H2** Es besteht eine signifikante Diskrepanz zwischen den WLTP-Normwerten und den unter realen Fahrbedingungen gemessenen Energieverbräuchen.

1.5 Aufbau der Arbeit

Die Thesis ist strukturiert in eine Einleitung, die den Kontext und die Relevanz des Themas einführt, gefolgt von einem theoretischen Hintergrund, der die technischen und normativen Grundlagen behandelt. Darauf folgt die Darstellung der Methodik, einschließlich Datenerhebung und -analyse, und abschließend die Ergebnisse und Diskussionen der durchgeführten Analysen.

Jedes Kapitel ist darauf ausgerichtet, die Forschungsfragen umfassend zu beantworten und die Hypothesen zu überprüfen, um letztlich fundierte Schlussfolgerungen über die Energieeffizienz von Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen zu ziehen. Der letzte Teil der Arbeit fasst die wichtigsten Erkenntnisse zusammen und diskutiert die praktischen Implikationen für Stakeholder in der Mobilitätsbranche sowie Vorschläge für zukünftige Forschungen in diesem Bereich.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Grundlagen zu Elektro- und Verbrennerfahrzeugen

EVs und ICEs stellen zwei grundlegend verschiedene Ansätze in der Automobiltechnologie dar, die jeweils ihre eigenen einzigartigen Vorteile und Herausforderungen mit sich bringen.

2.1.1 Elektrofahrzeuge

Elektrofahrzeuge nutzen eine Batterie als Energiequelle und einen Elektromotor statt eines traditionellen Verbrennungsmotors. Diese Konfiguration ermöglicht es EVs, Emissionen am Auspuff zu eliminieren, was sie zu einer umweltfreundlicheren Option im Vergleich zu herkömmlichen ICE-Fahrzeugen macht. Die Energie für EVs stammt aus der Elektrizität, die entweder aus dem Stromnetz bezogen oder durch regenerative Technologien wie Solar- oder Windkraft gewonnen werden kann. Die Umweltauswirkungen von EVs hängen daher stark von der Energiequelle ab, die zum Laden der Batterien verwendet wird. Ist die Energiequelle nachhaltig, sind die gesamten Umweltauswirkungen geringer (Advanced Engine and Fuels Technologies, o. J.).

EVs bieten außerdem den Vorteil niedrigerer Betriebskosten, da Strom in der Regel günstiger ist als Benzin oder Diesel und weil EVs weniger wartungsintensive Komponenten haben. Sie benötigen beispielsweise keine Ölwechsel oder komplexen Getriebesysteme, was zu langfristigen Kosteneinsparungen führen kann (U.S. Department of Energy).

2.1.2 Verbrennungsmotorfahrzeuge

Verbrennungsmotoren, die entweder mit Benzin oder Diesel betrieben werden, nutzen die Energie, die durch die Verbrennung von Kraftstoffen freigesetzt wird. Diese Technologie ist gut etabliert und bietet eine hohe Energiedichte, was zu einer ausgezeichneten Reichweite und schnellen Betankung führt. Allerdings führt die Verbrennung fossiler Brennstoffe zu erheblichen Emissionen von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen, was besonders in städtischen Gebieten ein großes Umweltproblem darstellt (Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle | US EPA, 2023).

ICEs sind in der Anschaffung oft günstiger als EVs, verursachen jedoch höhere Betriebskosten durch Kraftstoffverbrauch und regelmäßige Wartung, wie Ölwechsel und Austausch von Verschleißteilen. Moderne ICEs haben zwar erhebliche Verbesserungen in Bezug auf Emissionen und Effizienz erfahren, können aber den grundlegenden Nachteil der Emissionen nicht vollständig eliminieren (Energy.gov) (HowStuffWorks).

2.1.3 Zusammenfassung

Während EVs Vorteile in Bezug auf Umweltfreundlichkeit und Betriebskosten bieten, punkten ICEs mit etablierter Technologie und schneller Betankung. Die Wahl zwischen diesen

Fahrzeugtypen hängt oft von den spezifischen Bedürfnissen und Prioritäten der Nutzer sowie von der verfügbaren Infrastruktur ab. Mit fortschreitender Entwicklung der Batterietechnologie und des Ladensetzwerks könnten EVs jedoch eine immer attraktivere Option werden, was durch politische Anreize und wachsendes Umweltbewusstsein weiter verstärkt wird (Was unterscheidet reine Elektrofahrzeuge von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor? Unterschiede, Vor- und Nachteile von E-Autos im Überblick, o. J.).

2.2 ISO 23795-1:2022

Die ISO 23795-1:2022 ist ein ISO Standard im Bereich der intelligenten Transportsysteme. Er legt eine Methodik fest, wie Daten über Fahrten mittels nomadischer und mobiler Geräte erfasst und zur Schätzung des Kraftstoffverbrauchs sowie der CO₂-Emissionen genutzt werden können. Diese Norm ist speziell darauf ausgerichtet, Flottenmanagern, Logistikdienstleistern oder Fahrern zu ermöglichen, den Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen nachhaltig zu reduzieren (International Organization for Standardization, 2022).

2.2.1 Kernmerkmale des Standards

Die ISO 23795-1:2022 konzentriert sich auf die präzise Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs durch die Erfassung detaillierter Fahrtdaten und Geschwindigkeitsprofile. Diese Daten werden von einem Global Navigation Satellite System (GNSS) Empfänger, der in einem nomadischen Gerät (Nomadic Device, ND) integriert ist, erfasst. Die Datenübertragung erfolgt über mobile Kommunikationsnetze zu einem zentralen Server, wo sie analysiert werden, um die verschiedenen Komponenten des mechanischen Energieaufwands zu berechnen. Diese Komponenten umfassen:

- **Aerodynamik:** Der Luftwiderstand, den ein Fahrzeug während der Fahrt überwinden muss, beeinflusst den Energieverbrauch erheblich. Durch die Analyse der Geschwindigkeit und der Form des Fahrzeugs kann der aerodynamische Widerstand berechnet werden.
- **Rollreibung:** Der Widerstand, der durch den Kontakt der Reifen mit der Fahrbahn entsteht. Dieser hängt von der Reifenbeschaffenheit und dem Straßenzustand ab.
- **Beschleunigung/Bremsen:** Die Energie, die benötigt wird, um das Fahrzeug zu beschleunigen, sowie die Energie, die bei Bremsvorgängen verloren geht.
- **Steigungswiderstand:** Die zusätzliche Energie, die erforderlich ist, um Steigungen zu überwinden.
- **Standzeiten:** Die Energie, die während der Standzeiten, z.B. im Leerlauf an Ampeln, verbraucht wird.

Durch die Kombination dieser Faktoren können präzise Modelle zur Schätzung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen entwickelt werden, die sowohl für Echtzeit- als

auch für nachträgliche Analysen verwendet werden können (International Organization for Standardization, 2022).

2.2.2 Anwendung und Nutzen

Die ISO 23795-1:2022 bietet zahlreiche Vorteile und Anwendungsmöglichkeiten, die sich vor allem auf die Optimierung des Kraftstoffverbrauchs und die Reduktion der CO₂-Emissionen konzentrieren. Die Norm ermöglicht eine genaue Erfassung und Analyse von Fahrtdaten, was verschiedene positive Effekte zur Folge hat:

- **Optimierung des Kraftstoffverbrauchs** aufgrund von Identifikation ineffizienter Fahrmuster und der daraus folgenden Optimierung der Fahrweise
- **Verbesserung des Flottenmanagements** aufgrund von fundierten, datenbasierten Entscheidungen der Disposition mittels präziser Daten zu Kraftstoffverbrauch und Emissionen
- **Bewertung von Verkehrsmanagementmaßnahmen:** Analyse von Verkehrsflüssen sowie Engpassidentifikation, aber auch z. B. zur Erkennung von Auswirkungen von Verkehrsmanagementmaßnahmen auf die CO₂-Emissionen

Insgesamt bietet die ISO 23795-1:2022 eine strukturierte Methodik zur Erfassung und Analyse von Fahrtdaten, die es ermöglicht, den Kraftstoffverbrauch zu optimieren, die CO₂-Emissionen zu reduzieren und das Flottenmanagement effizienter und nachhaltiger zu gestalten.

2.2.3 Physikalische Grundlagen

Die physikalischen Grundlagen, die der ISO 23795-1:2022 zugrunde liegen, sind vielfältig und basieren auf den Prinzipien der Mechanik und Thermodynamik.

2.2.3.1 Mechanische Energie und Fahrzeugdynamik

Die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen basiert auf den Grundsätzen der mechanischen Energie. Die wichtigsten Komponenten hierbei sind:

- **Kinetische Energie:** Diese Energieform hängt von der Masse des Fahrzeugs und seiner Geschwindigkeit ab. Änderungen in der kinetischen Energie sind direkt mit Beschleunigung und Bremsvorgängen verbunden.
- **Potentielle Energie:** Diese Energieform ist relevant bei Fahrten über Steigungen und Gefälle. Sie hängt von der Höhe ab, die ein Fahrzeug überwinden muss.
- **Reibungskräfte:** Sowohl Rollreibung als auch Luftwiderstand sind wichtige Faktoren, die den Energieverbrauch beeinflussen. Rollreibung hängt von der Beschaffenheit der Reifen und der Straße ab, während der Luftwiderstand von der Fahrzeugform und der Geschwindigkeit abhängt (International Organization for Standardization, 2022).

2.2.3.2 Thermodynamik und Verbrennung

Der Kraftstoffverbrauch ist auch eng mit thermodynamischen Prozessen verbunden, insbesondere mit der Verbrennung von Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren. Wichtige Aspekte sind hier:

- **Wirkungsgrad des Motors:** Der Wirkungsgrad beschreibt, wie effizient der Motor den chemischen Energiegehalt des Kraftstoffs in mechanische Energie umwandelt. Ein höherer Wirkungsgrad bedeutet weniger Kraftstoffverbrauch und geringere CO₂-Emissionen.
- **Energieverluste:** Während des Verbrennungsprozesses und der mechanischen Arbeit treten unvermeidbare Energieverluste auf, z.B. durch Wärmeabgabe an die Umgebung und Reibungsverluste im Motor und Antriebsstrang (International Organization for Standardization, 2022).

2.2.3.3 Berechnungsmethoden

Die physikalischen Prinzipien werden durch komplexe mathematische Modelle umgesetzt, die verschiedene Parameter und deren Wechselwirkungen berücksichtigen. Diese Modelle basieren auf empirischen Daten und theoretischen Ansätzen, um präzise Vorhersagen über den Energieverbrauch und die Emissionen zu ermöglichen. Beispielsweise werden Geschwindigkeitsprofile, Fahrzeugmasse, Luftwiderstandskoeffizient und Rollwiderstand in die Berechnungen einbezogen (International Organization for Standardization, 2022).

2.2.3.4 Anwendung der Newtonschen Physik

Die ISO 23795-1:2022 basiert auf den Prinzipien der Newtonschen Physik. Insbesondere die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs durch GNSS-Geschwindigkeitsprofile nutzt diese Prinzipien. Das Newtonsche Bewegungsgesetz und die Energieerhaltung spielen eine zentrale Rolle bei der Bestimmung des Energieverbrauchs eines Fahrzeugs während der Fahrt (Willenbrock, 2023).

Beispielsweise wird die Energie, die notwendig ist, um ein Fahrzeug zu beschleunigen, durch das zweite Newtonsche Gesetz

$$F = m * a$$

bestimmt. Die Arbeit, die geleistet wird, um diese Beschleunigung zu erreichen, ist das Produkt aus der Kraft und der zurückgelegten Strecke. Diese Arbeit wird in Form von Kraftstoffverbrauch ausgedrückt und bildet die Grundlage für die Berechnungen, die in der ISO 23795-1:2022 verwendet werden (International Organization for Standardization, 2022; Willenbrock, 2023).

2.3 WLTP-Standard

Der Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure (WLTP) ist ein globaler Standard, der entwickelt wurde, um präzise und vergleichbare Daten über den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen von Fahrzeugen zu liefern. Dieser Standard wurde eingeführt, um die Unzulänglichkeiten des vorherigen New European Driving Cycle (NEDC) zu adressieren und eine realitätsnähere Darstellung der Fahrzeugleistung zu gewährleisten. Das Hauptziel des WLTP ist es, Verbrauchern und Herstellern bessere Informationen zur Verfügung zu stellen, um die Umweltauswirkungen von Fahrzeugen zu reduzieren (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure | VCA, 2021).

Dieser Standard wurde seit September 2017 schrittweise eingeführt und ab September 2018 verbindlich für alle neuen Fahrzeuge. Er beinhaltet umfangreichere Testverfahren und Bedingungen, die die realen Fahrbedingungen besser widerspiegeln sollen. Der Test umfasst vier Geschwindigkeitsbereiche:

- niedrig,
- mittel,
- hoch und
- sehr hoch,

die verschiedene Alltagsfahrbedingungen von städtischem Stop-and-Go-Verkehr bis zu Autobahnfahrten abdecken. Jeder dieser Bereiche beinhaltet unterschiedliche Aktivitäten wie Beschleunigen, Bremsen und Halten, was dazu beiträgt, dass die Tests die tatsächlichen Betriebsbedingungen besser abbilden (ACEA, 2017).

2.3.1 Vorteile

Die Hauptvorteile des WLTP liegen in seiner Fähigkeit, genauere und realistischere Messwerte zu liefern, die den Verbrauchern helfen sollen, informierte Entscheidungen beim Kauf von Fahrzeugen zu treffen. Durch die detailliertere Berücksichtigung von Fahrzeugoptionen und verschiedenen Fahrzuständen sollen die CO₂-Emissionen und der Kraftstoffverbrauch präziser berechnet werden, was sowohl Verbrauchern als auch Herstellern hilft, die Umweltauswirkungen besser zu verstehen und zu managen (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure | VCA, 2021).

2.3.2 Kritik

Obwohl der WLTP einen erheblichen Fortschritt gegenüber dem NEDC darstellt, gibt es weiterhin Herausforderungen und Kritikpunkte. Erstens sind die Testbedingungen immer noch laborbasiert, was bedeutet, dass einige Variablen des realen Fahrens, wie Wetterbedingungen und individuelle Fahrstile, nicht vollständig erfasst werden können. Dies kann dazu führen,

dass die realen Emissionen und der Verbrauch unter bestimmten Umständen von den Testergebnissen abweichen (Holloway, 2024).

Zweitens gibt es Bedenken bezüglich der globalen Einheitlichkeit des WLTP. Obwohl der Standard einen „globalen Kern“ hat, wird er in verschiedenen Regionen unterschiedlich angewendet, je nach lokalen Vorschriften und Bedürfnissen. Diese Inkonsistenzen können zu Schwierigkeiten bei der globalen Vergleichbarkeit von Fahrzeugemissionen führen, was insbesondere für international tätige Automobilhersteller problematisch sein kann (ACEA, 2017).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der WLTP bedeutende Verbesserungen gegenüber seinem Vorgänger bietet, indem er genauere und zuverlässigere Daten liefert, die eine bessere Entscheidungsgrundlage für Verbraucher und Politik bieten. Dennoch sind weitere Verbesserungen und Anpassungen nötig, um die Diskrepanzen zwischen Labor- und Realbedingungen weiter zu reduzieren und eine wirklich globale Standardisierung zu erreichen (ACEA, 2017; Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure | VCA, 2021; Holloway, 2024).

3 Methodik

3.1 Datenerhebung (Aufzeichnungen, Testbedingungen, Fahrerverhalten)

In diesem Kapitel wird erläutert wie reale Fahrdaten erhoben werden, die in einem darauffolgenden Schritt aggregiert und analysiert werden. Dafür wurden im März 2024 Fahrten mit einem Elektrofahrzeug (Opel Mokka E) und einem Verbrennerfahrzeug (VW Golf 8) aufgezeichnet. Diese Datensätze sollen es ermöglichen, eine Grundlage zu schaffen, anhand dessen mit Methoden der Data Science (*Interdisziplinäres Feld, das Methoden aus Mathematik, Statistik und Informatik nutzt, um Wissen und Erkenntnisse aus großen Datenmengen zu gewinnen*) die Hypothesen beantwortet werden können.

3.1.1 Testfahrzeuge

Für die Aufzeichnung der Fahrdaten wurden zwei Fahrzeuge aus der Kompaktklasse verwendet, welche mit folgenden Eigenschaften spezifiziert sind:

Tabelle 1: Übersicht über Fahrzeuge

	Opel Mokka E	VW Golf 8
Treibstoff		
Masse		
Luftwiderstandskoeffizient		
Querschnittsfläche		
Effizienz		
Treibstoff-Emissions-Faktor		
Rollwiderstandskoeffizient		
Stillstandsverbrauch		
WLTP-Klasse		

3.1.2 Mobile Datenaufzeichnung

Die Datenerhebung für diese Untersuchung wurde mithilfe einer speziell für LCMM entwickelten mobilen App durchgeführt, die in der Lage ist, detaillierte Fahrdaten im Sekundentakt

aufzuzeichnen. Diese App wurde auf Smartphones installiert, welche sowohl im Golf 8 als auch im Mokka E während den Vergleichsfahrten ausgeführt wurde.

Die erfassten Daten umfassen eine Vielzahl von Parametern, die für die Analyse der Energieeffizienz und des Fahrverhaltens von entscheidender Bedeutung sind. Im Folgenden werden die wichtigsten aufgezeichneten Parameter detailliert beschrieben:

Bezeichnung	Datenfeld	Beschreibung
Zeitstempel	Time [ms]	Jeder Datensatz enthält einen genauen Zeitstempel, der den Zeitpunkt der Aufzeichnung in Millisekunden seit dem 1. Januar 1970 (Unix-Zeit) angibt. Dies ermöglicht eine präzise Synchronisation und zeitliche Analyse der Fahrdaten.
Geografische Koordinaten	Latitude, Longitude	Die genauen geografischen Positionen des Fahrzeugs werden mittels GPS erfasst. Diese Daten sind essenziell, um die zurückgelegte Strecke, die Route und spezifische Standortdaten zu bestimmen.
Geschwindigkeit	Speed [$\frac{m}{s}$]	Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird in Metern pro Sekunde gemessen. Diese Information ist notwendig, um Beschleunigungsmuster und die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit zu analysieren.
Zurückgelegte Distanz	Distance [m]	Die Distanz wird in Metern gemessen und gibt die Strecke an, die das Fahrzeug seit der letzten Aufzeichnung zurückgelegt hat.
Höhe	Altitude [m]	Die Höhe über dem Meeresspiegel wird in Metern angegeben. Diese Daten sind besonders relevant für die Analyse von Fahrten in hügeligem oder bergigem Gelände, da Höhenunterschiede den Energieverbrauch beeinflussen können.
Beschleunigung	Acceleration [$\frac{m}{s^2}$]	Die Veränderung der Geschwindigkeit pro Sekunde wird gemessen, um das Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten des Fahrzeugs zu analysieren.

3.1.3 Standardisierung der Testbedingungen

Um die Vergleichbarkeit der Fahrdaten sicherzustellen und Verzerrungen durch unterschiedliche Testbedingungen zu vermeiden, wurden folgende Maßnahmen zur Standardisierung ergriffen:

Kriterium	Beschreibung
Gleiche Routen	Beide Fahrzeuge starteten und endeten an denselben Orten in Hamburg und folgten einer vordefinierten Route. Dies gewährleistet, dass die Fahrzeuge unter identischen geografischen und verkehrstechnischen Bedingungen getestet wurden.
Zeitfenster	Die Fahrten wurden an zwei aufeinanderfolgenden Werktagen, dem 4. und 5. März 2024, durchgeführt. Die Testfahrten fanden von morgens bis abends statt, um die Auswirkungen unterschiedlicher Tageszeiten und Verkehrsdichten zu berücksichtigen und zu minimieren.
Wetterbedingungen	Die Wetterbedingungen wurden während der Testtage kontinuierlich überwacht. Durch die Auswahl von zwei aufeinanderfolgenden Tagen wurde sichergestellt, dass die Witterungsverhältnisse vergleichbar waren, um externe Einflüsse auf den Fahrwiderstand und den Energieverbrauch zu minimieren.
Fahrerverhalten	Beide Fahrzeuge wurden parallel und synchronisiert gestartet, um Unterschiede im Fahrerverhalten auszuschließen. Die Fahrer hielten sich an eine vorab festgelegte Fahrweise, die gleichmäßige Beschleunigungs- und Bremsmanöver sowie konstante Geschwindigkeiten auf bestimmten Streckenabschnitten vorsah. Durch diese Standardisierung wurde gewährleistet, dass alle Fahrten unter möglichst identischen Bedingungen durchgeführt wurden.

Um die Zuverlässigkeit und statistische Signifikanz der Ergebnisse zu erhöhen, wurden insgesamt 30 Fahrten pro Fahrzeugtyp (Golf 8 und Mokka E) nahezu parallel durchgeführt, d. h. beide Fahrzeuge sind zum selben Zeitpunkt losgefahren. Diese wiederholten Messungen ermöglichen es, zufällige Schwankungen und Anomalien zu identifizieren und auszuschließen, wodurch die Datenbasis für die nachfolgende Analyse robuster und aussagekräftiger wird.

Durch diese detaillierte und systematische Datenerhebung wird eine solide Grundlage geschaffen, um die Energieeffizienz von Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen unter realen Fahrbedingungen präzise und zuverlässig zu vergleichen.

3.2 Analysemethodik

Um aussagekräftige und sinnvolle Ergebnisse bei der Datenanalyse zu erzielen, wird der **Data Science Lifecycle** als Struktur genutzt. Dieser Lifecycle besteht aus mehreren Phasen: Business Understanding, Data Mining, Data Cleaning, Data Exploration, Feature Engineering, Predictive Modeling und Data Visualization. Jede Phase ist entscheidend, um die gesammelten Fahrdaten systematisch zu aggregieren und zu analysieren.

1. **Business Understanding:** Der erste Schritt im Data Science Lifecycle ist das Verständnis des Geschäftskontexts und der Ziele der Analyse. In dieser Untersuchung ist das Ziel, die Effizienz und Nachhaltigkeit von Elektrofahrzeugen (EVs) im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (ICEs) zu bewerten. Dies wird durch die Analyse von Fahrdaten realisiert, die in Hamburg aufgezeichnet wurden.

Die zentralen Fragestellungen betreffen die Energieeffizienz unter realen Fahrbedingungen und den Vergleich mit den Normwerten des Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP).

2. **Data Mining:** In der Data Mining-Phase werden die Fahrdaten gesammelt und aufbereitet. Für diese Untersuchung wurden Fahrdaten sowohl von einem Elektrofahrzeug (Mokka E) als auch von einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (Golf 8) in Hamburg erhoben. Die Datenerhebung erfolgte werktags über zwei Tage, wobei jeweils 30 Fahrten pro Fahrzeug aufgezeichnet wurden. Diese Fahrdaten umfassen unter anderem Zeitstempel, geografische Koordinaten, Geschwindigkeit, zurückgelegte Distanz, Höhe, Beschleunigung sowie Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen.
3. **Data Cleaning:** Die Datenbereinigung ist ein kritischer Schritt, um die Qualität der Daten sicherzustellen. Hierbei werden Fehler und Inkonsistenzen in den Rohdaten beseitigt.

Dies umfasst:

- Entfernung von Ausreißern: Identifikation und Entfernung von Datenpunkten, die signifikant von der Norm abweichen.
- Behandlung fehlender Werte: Interpolation oder Entfernung von Datensätzen mit fehlenden Werten.
- Korrektur fehlerhafter Daten: Überprüfung und Korrektur von Datenpunkten, die durch Messfehler oder andere Anomalien entstanden sind.

4. **Data Exploration:** Nach der Datenbereinigung folgt die Datenexploration, bei der die Daten visuell und statistisch untersucht werden. Ziel ist es, erste Muster und Zusammenhänge in den Daten zu erkennen.

Hierbei werden unter anderem Verteilungen, Korrelationen und Zeitreihenanalysen durchgeführt, um ein besseres Verständnis der Daten zu erlangen.

5. **Feature Engineering:** Im Feature Engineering werden neue Merkmale (Features) aus den vorhandenen Daten abgeleitet, die für die Analyse relevant sind.

Beispiele für solche Features sind:

- Durchschnittliche Geschwindigkeit: Berechnung der durchschnittlichen Geschwindigkeit für jede Fahrt.
- Beschleunigungsprofile: Analyse der Beschleunigungs- und Verzögerungsmuster.
- Energieverbrauch pro Kilometer: Berechnung des Energieverbrauchs pro zurückgelegtem Kilometer.

6. **Predictive Modeling:** In der Phase des Predictive Modeling werden statistische Modelle erstellt, um Vorhersagen und Analysen durchzuführen. Hierbei werden verschiedene Modellierungsansätze wie Regressionsanalyse, Varianzanalysen oder Hypothesentests verwendet, um signifikante Unterschiede und Zusammenhänge in den Daten zu identifizieren.

7. **Data Visualization:** Abschließend werden die Ergebnisse der Analyse visualisiert, um sie anschaulich darzustellen und leichter interpretieren zu können. Dies umfasst die Erstellung von Diagrammen, Grafiken und Karten, die die wesentlichen Erkenntnisse verdeutlichen. Die Visualisierung unterstützt dabei, die Ergebnisse effektiv zu kommunizieren und die Implikationen für die Nutzung von Elektrofahrzeugen im Alltag zu verstehen.

Durch die Anwendung des Data Science Lifecycles auf die Fahrdaten wird eine strukturierte und systematische Analyse ermöglicht, die fundierte und aussagekräftige Ergebnisse liefert.

4 Datenanalyse

(Aggregation, Vorverarbeitung, KPI-Analyse, statistische Methoden, WLTP-Vergleich)

Die Datenanalyse bildet den Kern dieser Untersuchung, deren Ziel es ist, die Effizienz und Nachhaltigkeit von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren unter realen Fahrbedingungen zu bewerten. Aufbauend auf den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen detaillierten Datenerhebungen und standardisierten Testbedingungen, konzentriert sich dieser Abschnitt auf die systematische Verarbeitung und Analyse der gesammelten Daten. Der Prozess umfasst die Aggregation und Vorverarbeitung der Fahrdaten, die Definition und Analyse von Key Performance Indicators (KPIs), die Anwendung geeigneter statistischer Methoden zur Identifikation signifikanter Unterschiede sowie den Vergleich der realen Verbrauchswerte mit den Normwerten des Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP).

4.1 Datenaggregation und -vorverarbeitung

4.2 Analyse von Key Performance Indicators

Die Analyse der Key Performance Indicators (KPIs) ist ein entscheidender Bestandteil dieser Arbeit, um die Energieeffizienz und das Beschleunigungsverhalten von Elektrofahrzeugen (EVs) und Verbrennungsmotorfahrzeugen (ICEs) zu bewerten. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen des Energy Performance Index (EPI) und des Acceleration Performance Index (API) präsentiert und diskutiert. Diese Indizes wurden anhand von realen Fahrdaten ermittelt, die mit speziellen mobilen Datenaufzeichnungssystemen gesammelt wurden.

4.2.1 Berechnung des Energy Performance Index (EPI):

- Der EPI wurde berechnet, indem die gesamte verbrauchte Energie (in kWh) durch die gesamte zurückgelegte Strecke (in 100 km) und das Gewicht des Fahrzeugs (in Tonnen) geteilt wurde.

$$\text{EPI} = \frac{\text{Gesamtenergie (kWh)}}{\left(\frac{\text{Gesamtstrecke (km)}}{100} \right) * \text{Fahrzeuggewicht (t)}}$$

- Berechnung des Acceleration Performance Index (API): Der API wurde berechnet, indem die gesamte Energie für Beschleunigungsmanöver (in kWh) durch die gesamte zurückgelegte Strecke (in 100 km) und das Gewicht des Fahrzeugs (in Tonnen) geteilt wurde.

$$\text{API} = \frac{\text{Beschleunigungsenergie gesamt (kWh)}}{\left(\frac{\text{Gesamtstrecke (km)}}{100} \right) * \text{Fahrzeuggewicht (t)}}$$

4.2.2 R Skript

EPI-Berechnung:

```
{  
  calculateEPI <- function(data, weight_t) {  
    whole_distance_m <- sum(data$Distance, na.rm = TRUE)  
    whole_distance_km <- whole_distance_m / 1000  
  
    whole_energy_J <- sum(data$TotalWork.J., na.rm = TRUE)  
    whole_energy_kWh <- whole_energy_J / 3600000  
  
    # Energy per 100 km  
    energy_100km <- whole_energy_kWh / (whole_distance_km / 100)  
  
    # Calculate EPI  
    epi <- energy_100km / weight_t  
    return(epi)  
  }  
}
```

API-Berechnung:

```
calculateAPI <- function (data, weight_t) {  
  whole_distance_m <- sum(data$Distance, na.rm = TRUE)  
  whole_distance_km <- whole_distance_m / 1000  
  
  # Set NA fields to 0  
  data$AccWork.J.[is.na(data$AccWork.J.)] <- 0  
  
  # Set negative values to positive  
  data$AccWork.J.[data$AccWork.J. < 0] <- -data$AccWork.J.[data$AccWork.J. <  
0]  
  
  whole_energy_acc_J <- sum(data$AccWork.J., na.rm = TRUE)  
  whole_energy_acc_kWh <- whole_energy_acc_J / 3600000  
  
  # Acceleration energy per 100 km  
  energy_acc_100km <- whole_energy_acc_kWh / (whole_distance_km / 100)  
  # Calculate API  
  api <- energy_acc_100km / golf_weight_t  
  return(api)  
}
```

4.2.3 Darstellung der Ergebnisse

4.2.3.1 EPI

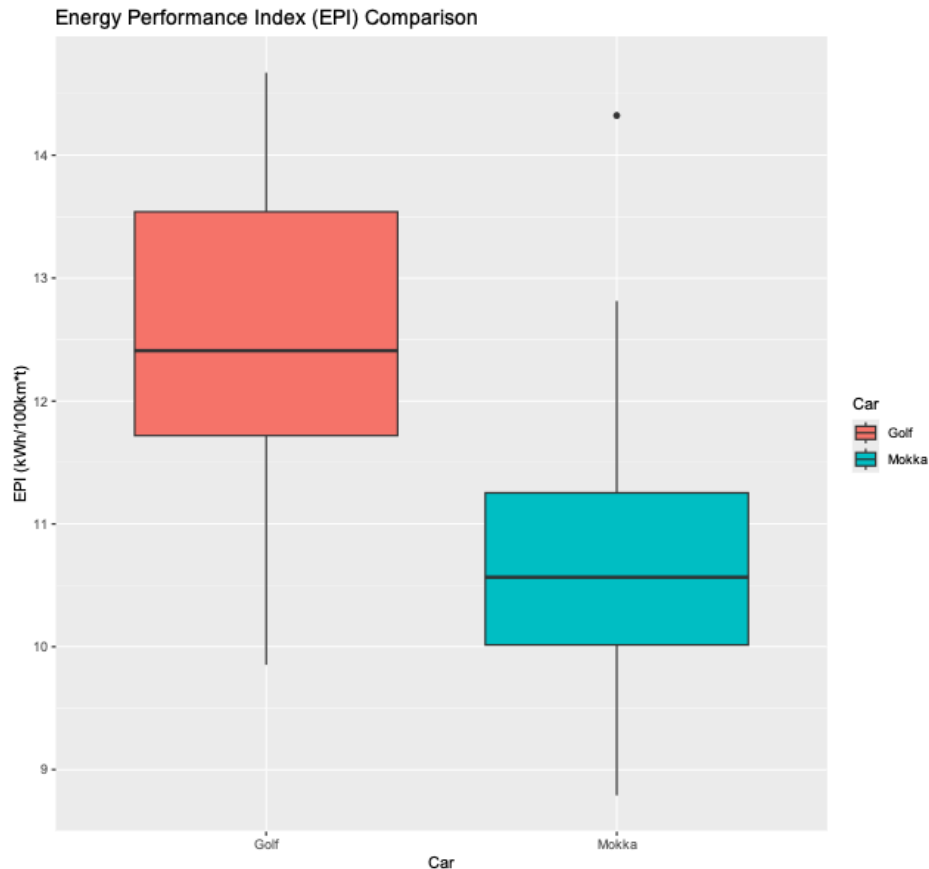


Abbildung 1: Energy Performance Index zwischen Golf und Mokka.

Der Boxplot für den Energy Performance Index (EPI) zeigt die Verteilung des Energieverbrauchs pro 100 km und Tonne Fahrzeuggewicht für den Opel Mokka E und den VW Golf 8.

- Opel Mokka E: Der Medianwert des EPI liegt bei etwa 12 kWh/100km*t. Die Verteilung zeigt eine relativ geringe Varianz, was auf eine konsistente Energieeffizienz hinweist. Es gibt einige Ausreißer, die auf variierende Fahrbedingungen oder unterschiedliche Fahrstile hinweisen könnten.
- VW Golf 8: Der Medianwert des EPI liegt bei etwa 13 kWh/100km*t, was höher ist als beim Opel Mokka E. Die Verteilung zeigt eine größere Varianz und mehrere Ausreißer, was auf eine weniger konsistente Energieeffizienz hinweist.

4.2.3.2 API

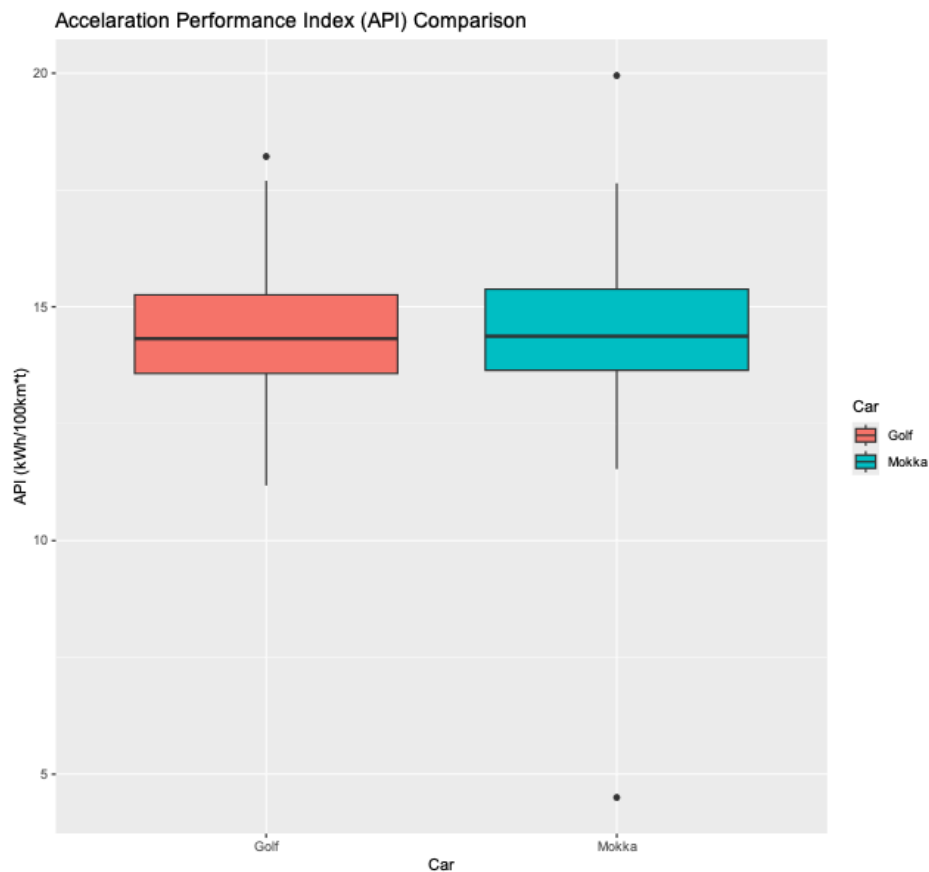


Abbildung 2: Acceleration Performance Index zwischen Golf und Mokka.

Der Boxplot für den Acceleration Performance Index (API) zeigt die Verteilung der Beschleunigungsenergie pro 100 km und Tonne Fahrzeuggewicht für den Opel Mokka E und den VW Golf 8.

- Opel Mokka E: Der Medianwert des API liegt bei etwa 14 kWh/100km*t. Die Verteilung zeigt eine moderate Varianz und einige Ausreißer, was auf unterschiedliche Beschleunigungsgewohnheiten oder variierende Verkehrsbedingungen hinweisen könnte.
- VW Golf 8: Der Medianwert des API liegt bei etwa 15 kWh/100km*t, was ebenfalls höher ist als beim Opel Mokka E. Die Varianz ist ähnlich der des Mokka, aber es gibt mehr Ausreißer, was auf eine größere Inkonsistenz bei den Beschleunigungsmanövern hinweist.

4.2.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Analyse der Boxplots zeigt, dass der Opel Mokka E sowohl im Energy Performance Index (EPI) als auch im Acceleration Performance Index (API) bessere Werte als der VW Golf 8 aufweist. Dies deutet darauf hin, dass Elektrofahrzeuge in Bezug auf Energieeffizienz und Beschleunigungsverhalten unter den getesteten Bedingungen Vorteile haben.

Energy Performance Index (EPI):

- Der niedrigere Medianwert und die geringere Varianz des EPI beim Opel Mokka E zeigen, dass Elektrofahrzeuge effizienter im Energieverbrauch sind und konsistentere Leistungen erbringen.
- Die höheren EPI-Werte und die größere Varianz beim VW Golf 8 könnten durch die weniger effiziente Verbrennungstechnologie und die höheren Betriebskosten verursacht werden.

Acceleration Performance Index (API):

- Der niedrigere Medianwert des API beim Opel Mokka E zeigt, dass Elektrofahrzeuge weniger Energie für Beschleunigungen verbrauchen, was auf die effiziente Nutzung der elektrischen Energie für Antriebsvorgänge zurückzuführen ist.
- Die höheren API-Werte und die größere Anzahl an Ausreißern beim VW Golf 8 deuten auf eine ineffizientere Nutzung der Energie bei Beschleunigungen hin, was durch die Eigenschaften des Verbrennungsmotors erklärt werden kann.

4.2.3.4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der KPI-Analyse unterstützen die Hypothese, dass Elektrofahrzeuge unter realen Fahrbedingungen eine höhere Energieeffizienz und ein besseres Beschleunigungsverhalten aufweisen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Weiterentwicklung und Förderung von Elektrofahrzeugen als nachhaltige Mobilitätslösung.

Für zukünftige Untersuchungen wäre es sinnvoll, die Analyse auf eine größere Anzahl von Fahrzeugen und Fahrbedingungen auszuweiten, um die Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Zudem könnten weitere KPIs, wie beispielsweise der CO₂-Ausstoß und die Betriebskosten, in die Analyse einbezogen werden, um ein umfassenderes Bild der Vorteile von Elektrofahrzeugen zu erhalten.

4.3 Regressionsanalyse

In diesem Kapitel wird eine detaillierte Analyse des Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen (EVs) und Verbrennungsmotorfahrzeugen (ICEs) durchgeführt. Dabei wird der Einfluss verschiedener Faktoren auf den Energieverbrauch untersucht, um ein besseres Verständnis der Effizienzunterschiede zwischen den beiden Fahrzeugtypen zu gewinnen. Es werden sowohl deskriptive Statistiken als auch eine Regressionsanalyse präsentiert.

4.3.1 Deskriptive Statistiken

Zunächst werden die deskriptiven Statistiken für den Energieverbrauch, die Durchschnittsgeschwindigkeit und die zurückgelegte Distanz für die beiden Fahrzeugtypen dargestellt. Die folgende Tabelle zeigt die mittleren Werte für diese Variablen:

Vehicle_Type	Energy_kWh_mean	Speed_kmh_mean	Distance_km_mean
<fct>	<dbl>	<dbl>	<dbl>
1 Golf	0.00154	28.3	0.00850
2 Mokka e	0.00152	31.1	0.00929

Listing 1: Deskriptive Statistiken

4.3.2 Visualisierung des Energieverbrauchs

Die folgende Abbildung zeigt einen Boxplot des Energieverbrauchs für die beiden Fahrzeugtypen. Hierbei wird die Verteilung des Energieverbrauchs für den VW Golf 8 und den Opel Mokka E verglichen.

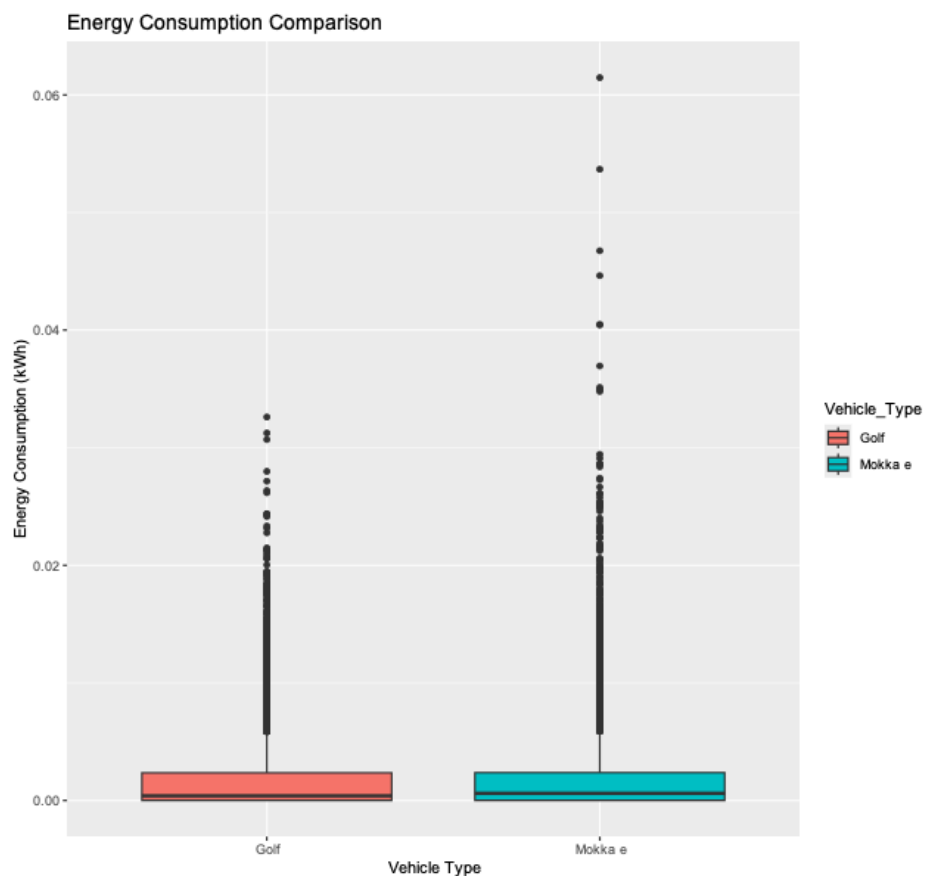


Abbildung 3: Vergleich des Energieverbrauchs beider Fahrzeugtypen

Analyse:

- Der mittlere Energieverbrauch ist bei beiden Fahrzeugtypen ähnlich, wobei der Opel Mokka E einen etwas niedrigeren Energieverbrauch aufweist.
- Die Verteilung der Energieverbrauchswerte zeigt, dass es beim VW Golf 8 mehr Ausreißer gibt, was auf eine größere Variabilität im Energieverbrauch hinweist.

4.3.3 Regressionsanalyse

Um die Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch genauer zu untersuchen, wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Die abhängige Variable ist der Energieverbrauch (kWh), während die unabhängigen Variablen der Fahrzeugtyp, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die zurückgelegte Distanz sind.

```
energy_model <- lm(Energy_kWh ~ Vehicle_Type + Speed_kmh
+ Acceleration.m.s.2. + Distance_km, data = combined_data)
```

Listing 2: ModellFormel

Call:

```
lm(formula = Energy_kWh ~ Vehicle_Type + Speed_kmh + Acceleration.m.s.2. +
Distance_km, data = combined_data)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.029941	-0.000958	-0.000316	0.000650	0.047272

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	5.692e-04	1.248e-05	45.61	<2e-16 ***	
Vehicle_TypeMokka e	-1.153e-04	1.142e-05	-10.10	<2e-16 ***	
Speed_kmh	7.170e-06	3.416e-07	20.99	<2e-16 ***	
Acceleration.m.s.2.	1.504e-03	6.411e-06	234.62	<2e-16 ***	
Distance_km	8.979e-02	7.655e-04	117.29	<2e-16 ***	

Signif. codes:	0 '***'	0.001 '**'	0.01 '*'	0.05 '.'	0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.001688 on 99038 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4563, Adjusted R-squared: 0.4563

F-statistic: 2.078e+04 on 4 and 99038 DF, p-value: < 2.2e-16

Listing 3: Modellformel und Ausgabe

- Der Intercept-Wert ist (5.692×10^{-4}), was der Grundverbrauch ohne Einfluss der erklärenden Variablen darstellt.
- Der Koeffizient für den Fahrzeugtyp (Mokka e) ist negativ und signifikant ($p < 2e-16$), was bedeutet, dass der Mokka e im Durchschnitt einen geringeren Energieverbrauch hat als der Golf.
- Die Geschwindigkeit ((Speed_kmh)) und Beschleunigung (Acceleration.m.s.2.) haben positive und signifikante Effekte auf den Energieverbrauch, was darauf hinweist, dass höhere Geschwindigkeiten und häufigere Beschleunigungen zu einem höheren Energieverbrauch führen.

- Die zurückgelegte Distanz (Distance_km) hat ebenfalls einen positiven und signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch.

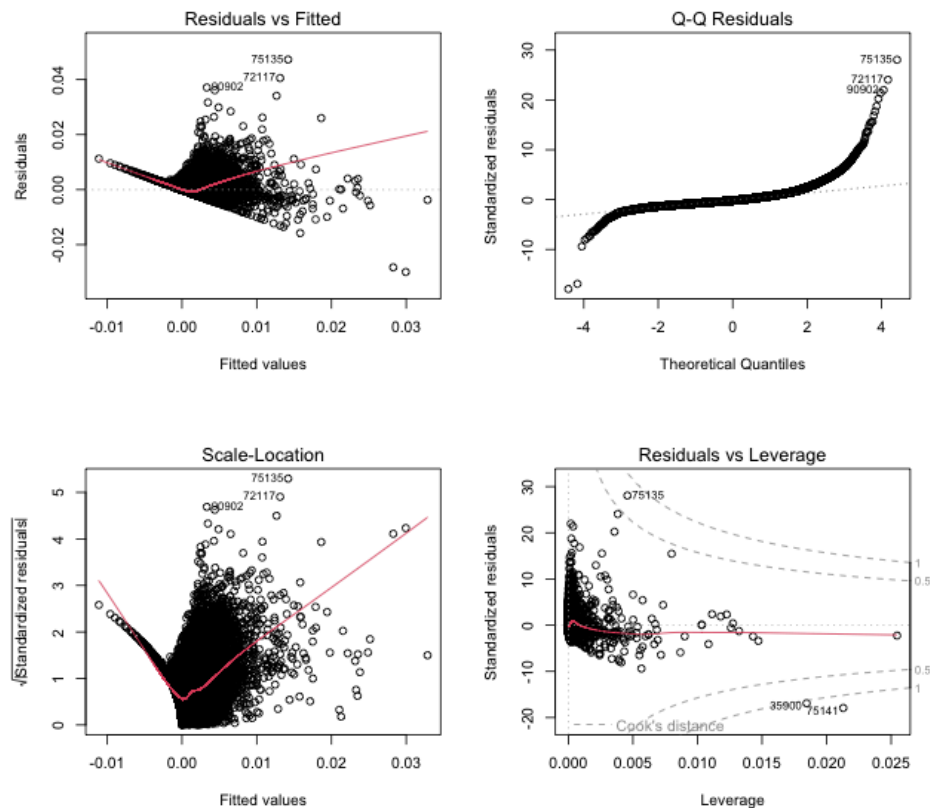


Abbildung 4: Diagnoseplots des Regressionsmodells

- Residuals vs Fitted: Die Verteilung zeigt keine großen systematischen Abweichungen, jedoch eine gewisse nicht-lineare Beziehung, die auf nicht erfasste Variablen hinweisen könnte.
- Q-Q Plot: Die Residuen folgen nicht perfekt der Normalverteilung, insbesondere in den Extremen, was auf mögliche Ausreißer hinweist.
- Scale-Location: Die Verteilung der Residuen zeigt eine leichte Heteroskedastizität, was bedeutet, dass die Varianz der Fehler nicht konstant ist.
- Residuals vs Leverage: Einige Datenpunkte haben hohe Hebelwirkungen und sind potenzielle Einflusswerte, die das Modell stark beeinflussen können.

4.3.4 Schlussfolgerungen

Die Regressionsanalyse bestätigt, dass der Fahrzeugtyp, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die zurückgelegte Distanz signifikante Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch sind. Der Opel Mokka E zeigt im Durchschnitt einen geringeren Energieverbrauch als der VW Golf 8, was die Hypothese unterstützt, dass Elektrofahrzeuge effizienter im Energieverbrauch sind.

Für zukünftige Analysen wäre es hilfreich, weitere erklärende Variablen zu berücksichtigen und möglicherweise nicht-lineare Modelle oder Interaktionseffekte zu untersuchen, um ein noch präziseres Modell des Energieverbrauchs zu entwickeln.

4.4 Statistische Methoden

4.5 Vergleich mit WLTP-Werten

4.6 Verwendete Software und Tools

5 Ergebnisse

5.1 Darstellung der analysierten Fahrzeugdaten

5.2 Analyse der Energieeffizienz beider Fahrzeugtypen

5.3 Vergleich der Realwerte mit WLTP und Diskussion von Abweichungen

5.4 „Diskussion“ zu CO₂-Emissionen

6 Diskussion

6.1 Interpretation der Ergebnisse

6.2 Limitation der Methodik

6.3 Einordnung in bestehende Forschung

6.4 Implikation für den Praxisfall

6.5 Selbstkritik und Limitationen der Arbeit

7 Fazit und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der zentralen Erkenntnisse

7.2 Praktische Implikationen für Stakeholder

7.3 Vorschläge für zukünftige Forschungen

8 Kein Teil

9 Einleitung

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore.

Wenn ich OIDC (*Open ID Connect*) zum ersten mal erwähne wird es ausgeschrieben.
Beim zweiten Mal wird OIDC nur abgekürzt.

Übrigens gibt es das Haus (*Besteht aus 4 Wänden und einem Dach*)

10 Grundlagen

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aeque doleamus animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et collaudata est, cum id, quod maxime placeat, facere possimus, omnis voluptas assumenda est, omnis dolor repellendus. Temporibus autem quibusdam et.

10.1 Unterpunkt

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aeque doleamus animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et collaudata est, cum id, quod maxime placeat, facere possimus, omnis voluptas assumenda est, omnis dolor repellendus. Temporibus autem quibusdam et.



Abbildung 5: A curious figure.

10.2 Unterpunkt

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aequaleam animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et collaudata est, cum id, quod maxime placeat, facere possimus, omnis voluptas assumenda est, omnis dolor repellendus. Temporibus autem quibusdam et.

10.2.1 Unter-Unterpunkt

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aequaleam animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et collaudata est, cum id, quod maxime placeat, facere possimus, omnis voluptas assumenda est, omnis dolor repellendus. Temporibus autem quibusdam et.

10.2.2 Unter-Unterpunkt

10.3 Unterpunkt

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aequaleam animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et collaudata est, cum id, quod maxime placeat, facere possimus, omnis voluptas assumenda est, omnis dolor repellendus. Temporibus autem quibusdam et.

10.3.1 Unter-Unterpunkt

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aequaleam animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et collaudata est, cum id, quod maxime placeat, facere possimus, omnis voluptas assumenda est, omnis dolor repellendus. Temporibus autem quibusdam et.

11 Zusammenfassung

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aequaleam animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et collaudata est, cum id, quod maxime placeat, facere possimus, omnis voluptas assumenda est, omnis dolor repellendus. Temporibus autem quibusdam et.

Bibliographie

- ACEA (2017). What is WLTP: the Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure? - WLTPfacts.eu. Available at: <https://www.wltpfacts.eu/what-is-wltp-how-will-it-work/>
- Advanced Engine and Fuels Technologies (o. J.). Available at: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/advanced-engine-and-fuels-technologies>
- Global EV Outlook 2023 – Analysis - IEA (2023). Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
- Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle | US EPA (2023). Available at: <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>
- Holloway, H. (2024). Report finds WLTP hugely over-estimates car fuel economy. Available at: <https://www.autocar.co.uk/car-news/consumer/report-finds-wltp-hugely-over-estimates-car-fuel-economy>
- International Organization for Standardization (2022). Intelligent Transport Systems - Extracting Trip Data Using Nomadic and Mobile Devices for Estimating CO2 Emissions - Part 1: Fuel Consumption Determination for Fleet Management. 1. Available at: <https://www.iso.org/standard/79357.html>
- Was unterscheidet reine Elektrofahrzeuge von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor? Unterschiede, Vor- und Nachteile von E-Autos im Überblick (o. J.). Available at: <https://www.emobility.energy/e-auto-magazin/e-autos-vs-verbrenner#:~:text=E%2DAutos%20haben%20keinen%20direkten,deutlich%20geringer%20als%20bei%20Verbrennermotoren.>
- Willenbrock, R. (2016). Low Carbon Mobility Management (LCMM). Available at: https://www.t-systems.com/resource/blob/338576/ca91c9a4e90eb7cd49f641ce14622688/EN_OP_LCMM.pdf
- Willenbrock, R. (2023). Low Carbon Mobility Management (LCMM).
- Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure | VCA (2021). Available at: <https://www.vehicle-certification-agency.gov.uk/fuel-consumption-co2/the-worldwide-harmonised-light-vehicle-test-procedure/>

KI-Verzeichnis

System	Prompt	Verwendung
OpenAI ChatGPT	Schreib meine Bachelorarbeit	Bachelorarbeit schreiben lassen und lieber Fortnite zocken
Google Gemini	Gib mir Motivationstipps	Die Nerven beibehalten

Anhang

A Wichtiger Anhang

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aequaleam animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et collaudata est, cum id, quod maxime placeat, facere possimus, omnis voluptas assumenda est, omnis dolor repellendus. Temporibus autem quibusdam et.

B Weiterer Wichtiger Anhang

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magnam aliquam quaerat voluptatem. Ut enim aequaleam animo, cum corpore dolemus, fieri tamen permagna accessio potest, si aliquod aeternum et infinitum impendere malum nobis opinemur. Quod idem licet transferre in voluptatem, ut postea variari voluptas distinguere possit, augeri amplificarique non possit. At etiam Athenis, ut e patre audiebam facete et urbane Stoicos irridente, statua est in quo a nobis philosophia defensa et collaudata est, cum id, quod maxime placeat, facere possimus, omnis voluptas assumenda est, omnis dolor repellendus. Temporibus autem quibusdam et.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit persönlich und selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß anderen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Zeichnungen, Abbildungen und Tabellen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt oder wurden mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen. Diese Arbeit wurde weder in gleicher noch in ähnlicher Form von mir an anderen Hochschulen zur Erlangung eines akademischen Abschlusses eingereicht.

Marius Lieb

Ulm, den 10.07.2024

