



Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Ergonomie

Die Änderung von Fahrerverhaltensmustern durch Nutzung eines Elektrofahrzeuges –

Gewöhnung an die fahrdynamischen und konzeptionellen Besonderheiten und Anwendung effizienter Fahrstrategien

Peer Magnus Helmbrecht

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prüfer der Dissertation:

Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

1. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

2. Prof. Dr. Josef F. Krems

Die Dissertation wurde am 20.09.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 27.04.2017 angenommen.





Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich in der einen oder anderen Weise bei der Erstellung dieser Arbeit begleitet haben. Beginnen möchte ich mit einem ganz besonderen Dank an Prof. Dr. phil. Klaus Bengler, der es mir ermöglichte diese Dissertation an einem nach wie vor aktuellen Forschungsthema durchzuführen und durch jederzeit offene und wertvolle Diskussion entscheidend zu meinem Erfolg beigetragen hat. Zudem danke ich Prof. Dr. Josef F. Krems für die Bereitschaft meine Arbeit zu begutachten.

Bei all meinen ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für Ergonomie möchte ich mich für die hilfreiche Diskussion meiner Forschungsfragen und auch für die willkommene Ablenkung im gelegentlich mühsamen Promotionsalltag bedanken. Natürlich danke ich ebenso den ehemaligen Kollegen vom Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik für die Implementierung der Smartphone-Applikation und die Möglichkeit die bestehende Infrastruktur mitzubeneutzen. Ein herzlicher Dank gilt an dieser Stelle auch den Mitarbeitern der Werkstatt für die kompetente Unterstützung bei der Fertigung des Messequipments für die Datenerfassung im Feldversuch. Außerdem danke ich Prof. Heiner Bubb für die schnelle Hilfe bei dringenden Fragen zum Mensch-Maschine-Regelkreis.

Meine Dissertation wäre ohne das in Zusammenarbeit mit der BMW Group durchgeführte und von dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie geförderte Schaufensterprojekt eMUC nicht möglich gewesen. In diesem Zusammenhang möchte ich allen Beteiligten dafür danken, dass ich dieses Forschungsthema in einem solch umfangreichen Feldversuch bearbeiten konnte. Mein besonderer Dank gilt dabei Dr. Roman Vilimek, der mich zudem während meiner Promotion als Mentor unterstützte. Außerdem danke ich allen Studenten, die im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten zur Durchführung der Versuche und zur Betreuung der Probanden beigetragen haben.

Zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunde, dass sie mich während der letzten Jahre trotz (oder gerade wegen) meiner verknappten Freizeit immer wieder ermutigen konnten das Vorhaben zu Ende zu bringen.



Kurzfassung

Das Elektrofahrzeug setzt den Fahrer mit seiner besonderen Antriebscharakteristik und den Einschränkungen durch die begrenzte Reichweite in ein gänzlich neues Verhältnis zum effizienten Fahren. Zum einen befindet sich der Fahrer im Spannungsfeld aus aufregend sportlicher Fahrdynamik und dem Wunsch oder der Notwendigkeit die verfügbare Energie möglichst effizient zu nutzen. Zum anderen folgt gerade das effiziente Fahren im Elektrofahrzeug anderen Gesetzmäßigkeiten als dies von dem Fahrzeug mit Verbrennungsmaschine bekannt ist. Bisherige Forschungsergebnisse aus Nutzerstudien haben ergeben, dass erst mit zunehmender Fahrerfahrung Strategien zum effizienten Fahren mit dem Elektrofahrzeug erlernt werden. Inwieweit das Erlernen elektrofahrzeugspezifischer Energiesparstrategien sich allerdings auf das alltägliche Fahrerverhalten auswirkt, wurde bisher nicht untersucht. Ziel dieser Dissertation ist es daher, mögliche Änderungen im Fahrerverhalten als Folge der regelmäßigen Nutzung eines Elektrofahrzeugs zu identifizieren und deren Auswirkungen auf die Energieeffizienz des Fahrstils zu quantifizieren. Um die Ergebnisse möglichst gut auf den tatsächlichen Anwendungsfall übertragen zu können, werden dazu in einem fünfmonatigen Feldversuch Fahrdynamikdaten in elektrischen Versuchsfahrzeugen, die von 35 Probanden für alltägliche Fahrten eingesetzt werden, aufgezeichnet. Ausgehend von der Theorie zum Erlernen spezifischer Strategien für sparsames Fahren mit dem Elektrofahrzeug werden für die effizienzbestimmenden Größen des Fahrerverhaltens Näherungskurven erzeugt, mit deren Passungsgüte das tatsächliche Erlernen eines auf die Energieeffizienz des Elektrofahrzeugs optimierten Fahrerverhaltens überprüft werden kann. Der Einfluss unterschiedlicher Rahmenbedingungen wird durch eine probandenindividuelle Betrachtung regelmäßig gefahrener Routen und deren Charakteristik berücksichtigt. Darüber hinaus werden der Effekt der zwischenzeitlichen Nutzung von Verbrennerfahrzeugen auf das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug untersucht und das praktisch erreichbare Einsparpotential durch eine optimale Fahrweise ermittelt. Zusammengefasst bieten die Ergebnisse dieser Dissertation damit die nötige Grundlage für eine nutzerorientierte Dimensionierung der Antriebsleistung zukünftiger Elektrofahrzeuge und die Konzeption von Benutzerschnittstellen zur Entschärfung des Reichweitenkonflikts. Die Umsetzung dieser Lösungen ist speziell für den Mischbetrieb im Carsharing oder in Dienstwagenflotten entscheidend für die Akzeptanz und bestimmt somit den Erfolg der Elektromobilität.



Abstract

Due to the limited range and specific characteristics of the power train, efficient driving is a completely new challenge for driving an electric vehicle. Not only has the conflict between the excitingly sportive driving dynamics and the reasonability of efficient driving differed from the habituations in conventional vehicles with internal combustion engine. But also the way to drive energy efficient with an electric vehicle is not the same. Previous studies showed that strategies for efficient driving with electric vehicles are learned by driving experience. However, there are no results whether an increasing knowledge of efficient driving strategies affects daily driver behaviour. Hence, the objective of this dissertation is to identify changes in driver behaviour caused by frequent usage of an electric vehicle, and to quantify their effects on driving efficiency. To enable best comparability with real world application cases driving dynamics data was recorded in a field trial over five months. 35 participants had an electric test vehicle for daily usage. The presence of a potential learning process in driver behaviour was evaluated using curve fitting algorithms. The influence of different settings was taken into account by an individual analysis of frequently driven routes. Furthermore, the effect of intermediate usage of vehicles with internal combustion engine was evaluated as well as the principally available energy saving potential. Therefore, the results of this dissertation provide a valuable base for user-oriented dimensioning of electric vehicles' power train and respective interfaces to support efficient driving in those cars. The application of these solutions is relevant for car-sharing and business fleet use cases of electric vehicles and finally; deciding the future of electric mobility.



| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG..... | 1 |
| 1.1 | Motivation | 1 |
| 1.2 | Ziele | 2 |
| 1.3 | Methodischer Aufbau..... | 3 |
| 1.4 | Inhaltlicher Aufbau..... | 3 |
| 2 | THEORETISCHE GRUNDLAGEN..... | 4 |
| 2.1 | Anforderungen der Elektromobilität | 4 |
| 2.1.1 | Die Besonderheiten von Elektrofahrzeugen..... | 4 |
| 2.1.2 | Effizientes Fahren im Elektrofahrzeug..... | 6 |
| 2.1.3 | Optimale Nutzung der begrenzten Reichweite | 8 |
| 2.2 | Fahrerverhalten und Fahrstil | 9 |
| 2.2.1 | Verwendung der Begriffe Fahrverhalten und Fahrerverhalten..... | 10 |
| 2.2.2 | Messbarkeit des Fahrerverhaltens | 11 |
| 2.2.3 | Bestimmung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens..... | 13 |
| 2.2.4 | Anwendung der Metriken zur Bestimmung von Veränderungen im Fahrerverhalten | 14 |
| 2.3 | Einflüsse auf das Fahrerverhalten | 16 |
| 2.3.1 | Einfluss von Motivation und Kompetenz auf das Fahrerverhalten | 16 |
| 2.3.2 | Fahrzeugbedingte Einflüsse auf das Fahrerverhalten | 17 |
| 2.3.3 | Umgebungsbedingte Einflüsse auf das Fahrerverhalten..... | 18 |
| 2.3.4 | Einflussgrößen auf das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug | 19 |
| 2.4 | Beschreibung von Lernprozessen im Fahrerverhalten | 20 |
| 2.4.1 | Psychologie des Lernens – menschliches Verhalten in der Interaktion mit Technik..... | 20 |
| 2.4.2 | Lernen im Anwendungsfall Elektromobilität..... | 21 |
| 2.4.3 | Einordnung der Lernprozesse in das Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe | 23 |
| 3 | FORSCHUNGSFRAGEN UND HYPOTHESEN | 27 |
| 3.1 | Optimieren die Fahrer von Elektrofahrzeugen ihr Fahrerverhalten hinsichtlich der Energieeffizienz? | 28 |
| 3.2 | Welcher Zusammenhang besteht zwischen den zeitlichen Veränderungen im Fahrerverhalten und individuellen Einflussgrößen?..... | 29 |
| 3.3 | Hat die zwischenzeitliche Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges einen Einfluss auf den Fahrstil im Elektrofahrzeug? | 29 |



| | | |
|--------|---|----|
| 3.4 | Kann ein EV-erfahrener Fahrer das Elektrofahrzeug bei Bedarf effizienter bewegen? | 31 |
| 4 | METHODIK | 32 |
| 4.1 | Versuchsfahrzeug MINI E..... | 32 |
| 4.2 | Probandenkollektiv | 33 |
| 4.3 | Versuchsablauf..... | 34 |
| 4.3.1 | Langzeitfeldversuch..... | 35 |
| 4.3.2 | Zwischenevaluation..... | 35 |
| 4.3.3 | Initialfahrt und Abschlussevaluation | 36 |
| 4.4 | Datenerfassung | 36 |
| 4.5 | Filtern der Rohdaten | 37 |
| 4.6 | Vorbereitung des Datensatzes zur Auswertung..... | 39 |
| 4.7 | Metriken zur Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerhaltens | 40 |
| 4.7.1 | Streckenbezogene Metriken | 41 |
| 4.7.2 | Validierung der streckenbezogenen Metriken..... | 43 |
| 4.7.3 | Manöverbezogene Metriken..... | 44 |
| 4.8 | Vorgehen zur Analyse zeitlicher Veränderungen | 45 |
| 4.8.1 | Auswertung im Probandendurchschnitt | 47 |
| 4.8.2 | Individuelle Auswertung..... | 48 |
| 4.9 | Vorgehen zur Auswertung des Einflusses der zwischenzeitlichen Nutzung von Verbrennerfahrzeugen | 50 |
| 4.10 | Vorgehen zur Auswertung der Sonderversuchsfahrt zum Einsparpotential | 51 |
| 4.11 | Verwendete statistische Methoden | 52 |
| 4.11.1 | ANOVA | 53 |
| 4.11.2 | Regression | 54 |
| 4.11.3 | Korrelation nach Spearman | 54 |
| 4.11.4 | t-Test..... | 54 |
| 4.12 | Vorversuche in der Sitzkiste zur Frequenzanalyse | 55 |
| 5 | ERGEBNISSE | 57 |
| 5.1 | Überblick Datensatz | 57 |
| 5.2 | Durchschnittliche Lernprozesse im Fahrerverhalten..... | 58 |
| 5.2.1 | Zeitliche Veränderungen in streckenbezogenen Metriken | 58 |



| | | |
|------------|---|------------|
| 5.2.2 | Zeitliche Veränderungen in manöverbezogenen Metriken..... | 67 |
| 5.2.3 | Zusammenfassende Betrachtung aller Lernkurven..... | 71 |
| 5.3 | Abhängigkeiten der individuellen Veränderungen im Fahrerverhalten | 73 |
| 5.3.1 | Vorbemerkung zum linearen Trend und dem Powerlaw | 73 |
| 5.3.2 | Individuelle Trends im Fahrerverhalten | 73 |
| 5.3.3 | Die Abhängigkeiten von Streckenlänge, Streckentyp und Fahrtrichtung..... | 80 |
| 5.3.4 | Zusammenfassende Betrachtung der individuellen Veränderungen im Fahrerverhalten | 82 |
| 5.4 | Einfluss der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges auf das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug..... | 82 |
| 5.4.1 | Unterschiede im Fahrerverhalten vor und nach der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeugs | 83 |
| 5.4.2 | Ablehnung von Hypothese 3 | 84 |
| 5.5 | Durch optimiertes Fahrerverhalten umsetzbares Einsparpotential | 85 |
| 5.5.1 | Energieersparnis auf der gesamten Referenzstrecke..... | 85 |
| 5.5.2 | Besonderheiten in den unterschiedlichen Streckenteilen | 87 |
| 5.5.3 | Bestätigung von Hypothese 4..... | 89 |
| 6 | ZUSAMMENFASSENDER DISKUSSION UND FAZIT..... | 91 |
| 7 | ABLEITUNG VON GESTALTUNGSEMPFEHLUNGEN | 93 |
| 7.1 | Auslegung der Antriebscharakteristik..... | 93 |
| 7.2 | Interaktionskonzepte und Assistenzsysteme..... | 94 |
| 8 | LITERATURVERZEICHNIS..... | 96 |
| | FORMELZEICHEN..... | 104 |
| | ANHANG A - BERECHNUNG DER METRIKEN..... | 106 |
| | ANHANG B - DESKRIPTIVE STATISTIK DES GESAMTDATENSATZES | 112 |
| | ANHANG C - NORMALISIERTER RMSE FÜR DIE NÄHERUNGSKURVEN..... | 114 |
| | ANHANG D - VARIANZANALYSE FÜR DIE NÄHERUNGSKURVEN..... | 116 |
| | ANHANG E - T-TESTS FÜR DEN VERGLEICH NORMAL-SPARSAM | 118 |



1 Einleitung

Auch wenn Nachhaltigkeitsaspekte wie die Senkung des globalen CO₂-Ausstoßes oder die Reduzierung lokaler Emissionen sicherlich ihre Rolle in der Diskussion der Elektromobilität spielen, so liegt die Notwendigkeit der Erforschung alternativer Antriebstechniken insbesondere in der Endlichkeit der natürlichen fossilen Ressourcen. Um das weltweit wachsende Mobilitätsbedürfnis auch weiterhin erfüllen zu können, bedarf es Antriebsformen, die auf flexibel erzeugte Energieträger zurückgreifen können. Gerade vor diesem Hintergrund eignen sich elektrische Antriebe. Diese bieten zudem den Vorteil einfacher konstruktiver Lösungen zur Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation), was insbesondere für das dynamische Fahren in dichtem Verkehr von Vorteil sein kann.

Im breiten Spektrum der elektrisch angetriebenen PKW, von Hybrid-Elektrischen Fahrzeugen (HEV), über Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCV) bis hin zu Elektrofahrzeugen mit Range-Extender (REX), übernehmen die Batterie-Elektrischen Fahrzeuge (BEV) eine Sonderrolle, da sie auf jegliche On-Board-Energieerzeugung verzichten. Damit verbunden sind spezifische Rahmenbedingungen, wie die verhältnismäßig geringe Reichweite und lange Nachladedauer. Zusammen mit den Mehrkosten gegenüber vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICE) werden dadurch die Vorteile des emissionsfreien Antriebs relativiert. Auch wenn ein Großteil der alltäglichen Fahrten durchaus im Aktionsradius heutiger Elektrofahrzeuge liegt, ist die Einschränkung der Flexibilität auf Grund der erschwerten Nachladeprozedur das entscheidende Thema bei Franke (2014). Um eine breite Marktdurchdringung zu erreichen, muss das Elektrofahrzeug allerdings bei vergleichbaren Kosten auch eine vergleichbare Alltagstauglichkeit wie das Verbrennerfahrzeug bieten. Zwar werden derzeit erhebliche Anstrengungen unternommen, um Batterietechnologien zu entwickeln, die dem fossilen Brennstoffspeicher in Energie- und Leistungsdichte gleichwertig sind (vgl. Tober & Lenz, 2016), doch solange das Nachladen von Elektrofahrzeugen nicht in derselben Zeit und mit der gleichen Fülle an angebotenen Nachladeorten durchgeführt werden kann, ist die Optimierung des Energieverbrauchs im BEV von größter Bedeutung. Neben der Erhöhung der Effizienz im Antriebsstrang und der Reduzierung von Fahrwiderständen, fällt dem Fahrer und seiner Fahrweise dabei ein entscheidender Anteil zu. Wie bereits Walsh, Carroll, Eastlake & Blythe (2010) gezeigt haben, kann durch einen entsprechenden Fahrstil der Energieverbrauch eines BEVs um einige Prozent gesenkt werden.

1.1 Motivation

Da der Fahrstil einen maßgeblichen Einfluss auf den Energieverbrauch und somit auf die Reichweite eines Elektrofahrzeuges hat, können zukünftige Fahrzeugkonzepte nur mit entsprechendem Wissen über das tatsächliche Fahrerverhalten optimal auf die Kundenanforderungen zugeschnitten werden. Um den bestmöglichen Kompromiss aus sportlicher Fahrdynamik und praxistauglicher Reichweite bei gleichzeitig akzeptablen Anschaffungskosten zu finden, muss geklärt



werden inwieweit sich die Nutzer an die Gegebenheiten eines Elektrofahrzeuges anpassen und welches Maß an fahrdynamischem Potential erforderlich ist.

Dabei ist es keineswegs ausreichend das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug nur ausschnittsweise zu betrachten. Aussagekräftige Ergebnisse können nur erzielt werden, wenn das Elektrofahrzeug über mehrere Monate als alltägliches Verkehrsmittel genutzt wird. Denn Nutzerstudien, deren Ergebnisse im Wesentlichen auf Fragebögen und Interviews basieren, haben ergeben, dass Nutzer von Elektrofahrzeugen mit zunehmender Fahrerfahrung die Begrenztheit der Reichweite deutlich weniger kritisch einschätzen als ungeübte Fahrer (Franke, Cocron, Bühler, Neumann & Krems, 2012a; Labeye, Hugot, Regan & Brusque, 2012; Woodjack et al., 2012). Der erste Eindruck, den ein Elektrofahrzeug vermittelt, entspricht also nicht der Einschätzung erfahrener Nutzer. So kommt Neumann (2015) zu dem Ergebnis, dass eine größere Fahrerfahrung im Elektrofahrzeug zu einer höheren Kompetenz im energieeffizienten Fahren führt. Zusammen mit den Aussagen von Labeye et al. (2012) lässt sich demnach vermuten, dass ein genereller Lernprozess zur Reichweitenoptimierung unter Anwendung energieeffizienter Fahrstrategien stattfindet. Dies würde bedeuten, dass die begrenzte Reichweite nicht nur immer weniger als Barriere wahrgenommen wird, sondern dass ein erfahrener Fahrer auch im alltäglichen Betrieb mit deutlich weniger Reichweite zufrieden sein könnte.

Ob die Nutzer von Elektrofahrzeugen aber tatsächlich bereit sind, dauerhaft auf das große Potential an hochdynamischem Fahrgefühl, das der E-Antrieb bietet, zu verzichten und ihren Fahrstil langfristig und einheitlich in Richtung einer effizienten und reichweitenoptimierten Fahrweise zu verändern, wurde bisher nicht geklärt. Gerade dies ist allerdings entscheidend für die Dimensionierung der Batterie, die Auslegung des Antriebstrangs und schließlich auch für die Konzeption von Fahrerassistenzsystemen zur Unterstützung von effizientem Fahren.

1.2 Ziele

Ziel dieser Dissertation ist es, die Frage zu klären, ob die tägliche Nutzung eines Elektrofahrzeuges zu objektiv erfassbaren Veränderungen im Fahrerverhalten führt. Dabei soll untersucht werden, inwiefern solche Änderungen der Fahrweise entlang einer allgemeinen Lernkurve verlaufen; ob die Fahrer also durch täglich wiederholte Anwendung effizienter Fahrstrategien die Reichweite ihres BEVs schrittweise erhöhen können. Entscheidende Einflussgrößen, wie die Beschaffenheit alltäglich gefahrener Routen, sind dabei ebenso zu berücksichtigen, wie die zwischenzeitliche Nutzung von Verbrennerfahrzeugen, da sie einerseits die Notwendigkeit einer reichweitenoptimierten Fahrweise bedingen und andererseits mögliche Lernprozesse verlangsamen oder umkehren könnten. Außerdem soll die individuelle Entwicklung von Fahrstilpräferenzen mit zunehmender Fahrerfahrung im Elektrofahrzeug erfasst und ihre Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall identifiziert werden.



Die hier gewonnenen Ergebnisse sollen eine Grundlage für die fahrdynamische Konzeption künftiger Elektrofahrzeuge im Spannungsfeld von geringer Reichweite und sportlicher Performanz bieten. Die Identifikation von Lernprozessen im Umgang mit der Reichweite von Elektrofahrzeugen erlaubt zudem die Ableitung von Handlungs- und Gestaltungsempfehlungen für den Einsatz von EVs im Wechselbetrieb mit Verbrennerfahrzeugen. Dies ist besonders bedeutend für die typischen Anwendungsfälle des EVs im Car-Sharing, im Dienstwagen-Pool oder als Zweitfahrzeug.

1.3 Methodischer Aufbau

Grundlage für die Untersuchung des Fahrerverhaltens ist ein mehrmonatiger Feldversuch mit Elektrofahrzeugen im Großraum München. Von jedem Probanden wurden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile aufgezeichnet. Die objektive Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens erfolgte anhand von Metriken, die in Feldversuchen mit Verbrennerfahrzeugen gewonnen wurden und im Rahmen dieser Arbeit für den Fall im Elektrofahrzeug modifiziert und validiert wurden. Eine Charakterisierung der Streckenbedingungen erfolgte über das GPS-Signal. Zur Überprüfung der Gültigkeit allgemeiner Lernprozesse wurden für die Durchschnittswerte aller Probanden Näherungskurven mit konstantem, linearem und exponentiellem Verlauf erzeugt und deren Passungsgüte mit der einer Powerfunktion nach dem Powerlaw of Practice (Newell & Rosenbloom, 1981) verglichen. Die Bewertung individueller Veränderungen erfolgte anhand des linearen Trends. Rahmenbedingungen, wie die zwischenzeitliche Nutzung von Verbrennerfahrzeugen, wurden phasenweise in Fahrtenbüchern protokolliert. Zusätzliche Versuchsfahrten unter kontrollierten Bedingungen auf einer Referenzstrecke bieten eine methodische Stütze zur Eliminierung von Störvariablen.

1.4 Inhaltlicher Aufbau

Im Folgenden werden zunächst in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der Elektromobilität und deren Einflüsse auf das Fahrerverhalten dargestellt. Lerntheorien im Umgang mit unbekanntem technischen Geräten und deren aktuelle Anwendung im Fall der Elektromobilität bilden dabei den zweiten Schwerpunkt des Grundlagenteils. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 die Forschungsfragen aufgestellt und die zugehörigen Hypothesen abgeleitet. Kapitel 4 beschreibt das methodische Vorgehen hinsichtlich des Versuchsdesigns, der Datenerfassung und Auswertung. Die Ergebnisse werden getrennt für die vier Forschungsfragen in Kapitel 5 dargestellt und zusammenfassend in Kapitel 6 diskutiert. Kapitel 7 enthält die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen.



2 Theoretische Grundlagen

Grundlagen für die Untersuchung des Fahrerverhaltens sind zunächst die durch das Prinzip des elektrischen Antriebs bedingten Anforderungen der Elektromobilität. Weiterhin werden die Begriffe Fahrerverhalten, Fahrverhalten und Fahrstil im Kontext dieser Arbeit definiert und geeignete Metriken zur Erfassung dieser Kenngrößen ermittelt. Für die weitergehende Betrachtung erfolgt eine Identifizierung der relevanten Einflüsse auf das Fahrerverhalten. Abschließend wird eine Übersicht gängiger Lerntheorien im Umgang mit unbekanntem technischen Systemen und deren Funktionen mit Anwendungsbeispielen im Kontext der Elektromobilität gegeben.

2.1 Anforderungen der Elektromobilität

Die Elektromobilität stellt durch spezifische Nutzungsbedingungen und eine spezielle Antriebscharakteristik besondere Anforderungen an den Fahrer. Auch wenn einzelne Randbedingungen im Zuge der stetigen technischen Weiterentwicklung zunehmend an Bedeutung verlieren können, so bleiben die prinzipiellen Unterschiede zwischen batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen und herkömmlichen Verbrennerfahrzeugen grundlegend bestehen.

2.1.1 Die Besonderheiten von Elektrofahrzeugen

Als Besonderheit von Elektrofahrzeugen gilt das Zusammenspiel aus begrenzter Reichweite, langer Nachladedauer und geringer Verfügbarkeit von Nachlademöglichkeiten. Der daraus resultierende Reichweitenstress ist nach wie vor der Schwerpunkt der Nutzerforschung der Elektromobilität und wird bisweilen auch als Hinderungsgrund für den Erfolg der Elektromobilität gesehen (vgl. Egbue & Long, 2012; Franke, Neumann, Bühler, Cocron & Krems, 2012b; Rauh, Franke & Krems, 2015).

Der Stress, der durch die Reichweitenbegrenzung entsteht, hat nicht nur Einfluss auf das Nutzungsverhalten, also die Verwendung des EVs für bestimmte Fahrtzwecke und Routen. Auch das Fahrerverhalten kann durch das Ziel möglichst effizient zu fahren nachhaltig beeinflusst werden (vgl. Labeye et al., 2012). Inwiefern dies allerdings auch anhand fahrdynamischer Größen messbar ist, wurde bisher ebenso wenig abschließend geklärt wie die individuellen Einflüsse auf mögliche Veränderungen im Fahrerverhalten.

Im Hinblick auf die stetige Weiterentwicklung von elektrischen Energiespeichern für den automobilen Einsatz (Tober & Lenz, 2016) sei hier erwähnt, dass zwar die relativen Kapazitäten weiter erhöht und die Ladedauern reduziert werden können. Vor dem Hintergrund einer möglichst optimalen Lebensdauer der Batterie und entsprechender Anschaffungskosten wird die Bereitstellung von Reichweite jedoch weiterhin ein entscheidender Kostenfaktor beim Elektrofahrzeug bleiben. In diesem Zusammenhang muss auch hervorgehoben werden, dass die begrenzte Reichweite rein objektiv



betrachtet für die Mehrzahl der täglichen Anwendungen auch im internationalen Vergleich keine absolute Hürde ist. Beispielsweise liegt selbst im Flächenland USA die Streckenlänge für 90% der täglichen Fahrten unter 140 km (Hajiamiri & Wachs, 2010) und damit durchaus im Bereich heutiger Elektrofahrzeuge. Viel entscheidender ist die subjektiv empfundene komfortable Restreichweite (Franke et al., 2012a; Franke et al., 2012b), die nicht allein von der Kapazität des Energiespeichers, sondern von der Änderungsrate der im Bordinstrument angezeigten verfügbaren Restreichweite und dem Vorhandensein von Nachlademöglichkeiten abhängt.

Über die batteriebedingten Besonderheiten des Elektrofahrzeuges hinweg bietet der elektrische Antriebsstrang gegenüber dem verbrennungsmotorischen Pendant auch eine andere fahrdynamische Performanz. Durch die gleichmäßige Drehmomententfaltung der E-Maschine ab Stillstand ist kein Schaltgetriebe notwendig.

Wie in Abbildung 2-1 ersichtlich, kann mit einem Elektrofahrzeug ohne Drehmomentensprünge aus dem Stillstand bis zur Höchstgeschwindigkeit beschleunigt werden (Wallentowitz, Freialdenhoven & Olschewski, 2010). Dass von diesem hohen Beschleunigungspotential auch Gebrauch gemacht wird, zeigten unter anderem Alessandrini & Orecchini (2003) bei der Analyse von typischem Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug.

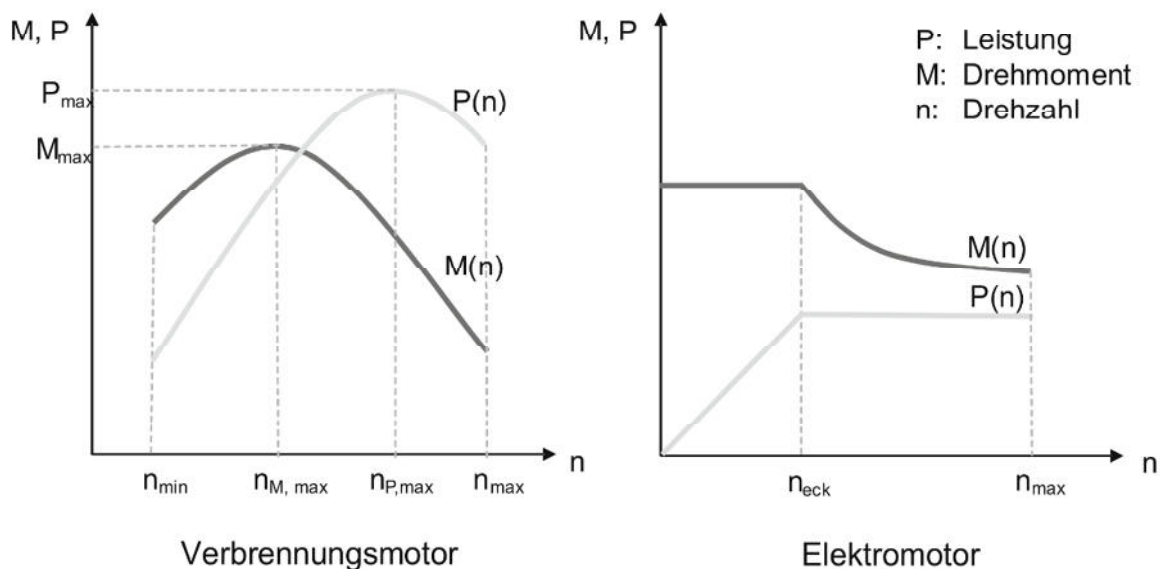


Abbildung 2-1: Leistungscharakteristika von Verbrennungs- und Elektromotoren (Wallentowitz et al., 2010)

Außerdem zeichnet sich der schaltstufenfreie Antrieb des EVs durch ein entsprechend direktes Ansprech- und Beschleunigungsverhalten in sämtlichen Geschwindigkeitsbereichen aus. Zusammen mit der Rekuperation ermöglicht das Elektrofahrzeug dem Fahrer somit ein völlig neues Spektrum an fahrdynamischer Agilität, das im Falle der Integration der Rekuperationsfunktion in das Fahrpedal das



Ein-Pedal-Fahren (*One-Pedal-Driving*) mit vollständigem Verzicht auf die Betätigung der mechanischen Reibbremse erlaubt (vgl. Bubb, Bengler, Grünen & Vollrath, 2015; Turrentine, Garas, Lenz & Woodjack, 2011). Diese besonders dynamische Antriebscharakteristik ist dabei jedoch nicht den rein batteriegetriebenen EVs vorbehalten, sondern gilt für sämtliche Fahrzeuge mit Elektromotor.

2.1.2 Effizientes Fahren im Elektrofahrzeug

Anders als im Verbrennerfahrzeug, bei dem durch Betreiben des Motors im Bereich optimaler Wirkungsgrade Sägezahnprofile die effizienteste Fahrweise darstellen (Li & Peng, 2012), ist im EV aufgrund des guten Wirkungsgrades der E-Maschine in allen Drehzahlbereichen das gleichmäßige Fahren ausschlaggebend für einen geringen Energieverbrauch (Adornato, Patil, Filipi, Baraket & Gordon, 2009). In Abbildung 2-2 sind die Wirkungsgradkennfelder für die E-Maschine und den Verbrennungsmotor dargestellt.

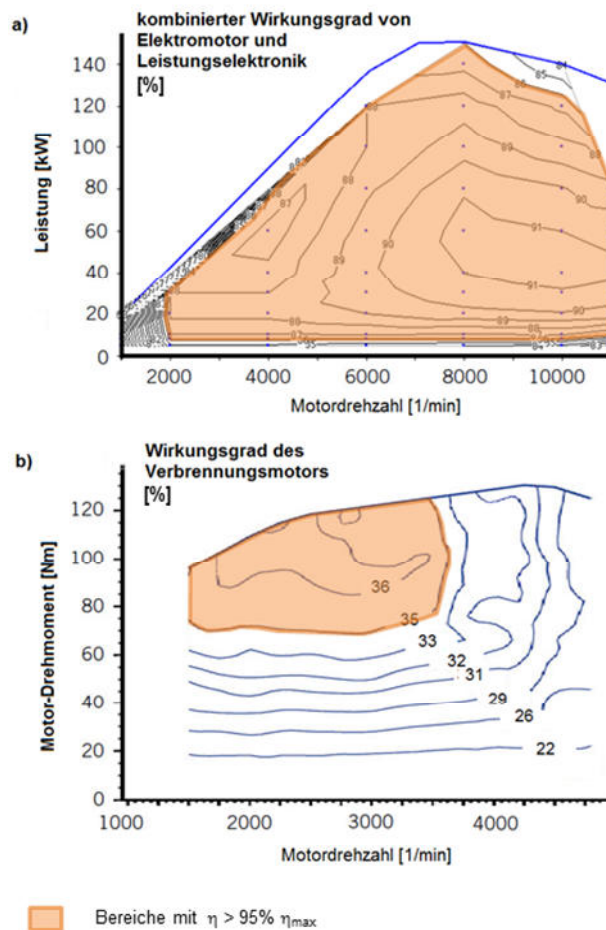


Abbildung 2-2: Wirkungsgradkennfelder von a) E-Maschine mit Leistungselektronik und b) Verbrennungsmotor mit Kennzeichnung von Bereichen, in denen der Wirkungsgrad größer als 95% des jeweiligen maximalen Wirkungsgrades ist (nach AC Propulsion, 2013 und Tober & Lenz, 2016)



Im Gegensatz zur Verbrennungsmaschine, die eine deutliche Drehzahl- und Lastabhängigkeit des Wirkungsgrades aufweist, lässt sich der elektrische Antriebsstrang nahezu über das gesamte Drehzahlband und unterschiedliche Leistungsanforderungen gleichermaßen effizient betreiben. Durch die meist feste Getriebeübersetzung spielen im EV unterschiedliche Wirkungsgrade verschiedener Getriebestufen keine Rolle für die Gesamteffizienz des Antriebs. Somit bleiben allein die Fahrwiderstände als last- und geschwindigkeitsabhängige Komponente in der Effizienzbeurteilung zu berücksichtigen. Ohne genauer auf die einzelnen Koeffizienten und Fahrzeugkonstanten (vgl. Braess & Seiffert, 2013; Wallentowitz et al., 2010; Formelzeichen siehe Anhang) einzugehen, sind die Abhängigkeiten der einzelnen Fahrwiderstände von der Geschwindigkeit und Beschleunigung, die der Fahrer vom Fahrzeug fordert, in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Tabelle 2.1: Abhängigkeiten der Fahrwiderstände vom längsdynamischen Fahrerverhalten

| Fahrwiderstand | Berechnung | Abhängigkeit vom Fahrerverhalten |
|---------------------------|---|---|
| Rollwiderstand | $F_{roll} = m \cdot g \cdot f_{roll}(v) \cdot \cos(\alpha)$ | F(v) |
| Luftwiderstand | $F_{luft} = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v^2$ | $\sim v^2$ |
| Beschleunigungswiderstand | $F_{beschl} = e_i \cdot m \cdot a$ | $\sim a$ |
| Steigungswiderstand | $F_{steig} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$ | |

Mit höherer Geschwindigkeit und stärkerer Beschleunigung nehmen die Fahrwiderstände also zu, während der Wirkungsgrad des Antriebsstranges in etwa gleich bleibt. Ein effizientes Fahren im Elektrofahrzeug wird also durch Vermeidung hoher Geschwindigkeiten und gleichmäßiges Fahren erreicht. Entscheidend ist bei EVs auch der gezielte Einsatz der Rekuperation. Denn die Energierückgewinnung ist nach aktuellem Stand der Technik immer noch mit erheblichen Verlusten verbunden, die auf die Ladestrombegrenzung bei der Rückspeisung in die Batterie zurückzuführen sind (vgl. Tober & Lenz, 2016). Darüber hinaus hängt der Wirkungsgrad kaum von der Intensität der Rekuperation ab. Deshalb kann es effizienter sein, das Fahrzeug rollen zu lassen, als zu stark zu rekuperieren. Zusammenfassend lassen sich folgende Regeln für das energieeffiziente Fahren im Elektrofahrzeug definieren:

- Vermeidung von starker Beschleunigung und hoher Endgeschwindigkeit
- Möglichst gleichmäßiges Fahren, zur Vermeidung unnötiger Beschleunigungs- und Bremsverluste
- Vermeidung von starker Rekuperation und der Verwendung der Reibbremse



Dem Fahrer eines Elektrofahrzeuges kommt also zur Vermeidung von Reichweitenproblemen die verantwortungsvolle Aufgabe zu, das Elektrofahrzeug möglichst sparsam, also gleichmäßig, ohne unnötiges Beschleunigen oder Verzögern vorausschauend zu bewegen (Alvarez, Lopez & De la Torre, N., 2014; Dardanelli et al., 2012). Im Gegensatz zu Strategien für sparsames Fahren im Verbrennerfahrzeug, in dem auch die Gangwahl den Verbrauch entscheidend beeinflusst, hat der Fahrer im Elektrofahrzeug mit im Fahrpedal integrierter Rekuperationsfunktion nur diese eine Eingabeschnittstelle zur fahrerverhaltensbedingten Optimierung des Verbrauches.

2.1.3 Optimale Nutzung der begrenzten Reichweite

Eine optimale Ausnutzung der vorhandenen Reichweite lässt sich auf zwei Wegen erzielen. Zum einen kann durch konstruktive Maßnahmen am Antriebsstrang, an der Fahrzeugaerodynamik und den Nebenaggregaten die Energieumwandlung möglichst effizient gestaltet werden. Zum anderen birgt die Optimierung des Fahrstils ein wesentliches Potential zur Einsparung von Energie (Walsh et al., 2010). Für die Umsetzung eines effizienten Fahrstils sind laut Dorrer (2003) das *Wissen*, das *Wollen* und das *Können* entscheidend (vgl. Abbildung 2-3).



Abbildung 2-3: Einflussfaktoren der verbrauchsgünstigen Fahrweise (Dorrer, 2003)

Während das *Wollen* sehr variabel von inneren und äußeren Faktoren motiviert wird und das *Können* eine Folge der Trainingsmöglichkeiten und der Erfahrung ist, ergibt sich das *Wissen* durch die Informationen, die dem Fahrer zur jeweiligen Situation vorliegen, zusammen mit dem technischen



Verständnis. Im EV kann das *Wollen* auch zu einem *Müssen* werden, wenn das Ziel ohne optimierte Fahrweise mit der verfügbaren Batterieladung nicht mehr erreicht werden kann. Auch der Faktor Zeitdruck ist im EV gesondert zu gewichten, denn das Nachladen ist deutlich zeitaufwändiger als der geringe Zeitverlust, der durch eine gleichmäßige Fahrweise entstehen könnte.

Bei Nutzung des EV bewegt sich der Fahrer also stets im Spannungsfeld zwischen aufregend sportlicher Fahrdynamik und beengender Reichweitenreserve (vgl. Neumann, 2015). Im Gegensatz zum Verbrenner wird ein effizienter Fahrstil im Elektrofahrzeug somit nicht allein durch monetäre Faktoren motiviert, sondern durch die prinzipielle Nutzbarkeit des EVs für bestimmte Fahrtzwecke. Umgekehrt bedeutet dies, dass das Elektrofahrzeug für bestimmte Strecken erst durch einen entsprechend effizienten Fahrstil nutzbar wird.

Ein Ansatzpunkt, den Fahrer von Elektrofahrzeugen zu unterstützen, ist der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen (FAS), die die Reichweite durch verbrauchsreduzierende Maßnahmen erweitern. Auf die Reduktion der Betriebslast von Nebenverbrauchern, insbesondere der Klimaanlage, sei hier nicht weiter eingegangen, da das fahrdynamische Fahrerverhalten als solches davon unbeeinflusst bleibt. Auf eine Reichweitenerhöhung durch effizienzoptimiertes Fahrerverhalten zielen Fahrmodischalter, wie sie in heute üblichen Elektrofahrzeugen zu finden sind. Durch eine weniger steile Pedalkennlinie beschleunigt das Fahrzeug bei gleicher Pedalbetätigung weniger stark als im normalen Fahrmodus, was zu einer insgesamt gleichmäßigeren und somit verbrauchsärmeren Fahrweise führen soll (Bubb et al., 2015). Dabei geben diese Systeme allerdings nur feste Rahmengrößen vor und reagieren nicht dynamisch auf sich verändernde Verkehrssituationen. Im Rahmen der von den Systemen gesetzten Grenzen bleibt es also immer noch dem Fahrer selbst überlassen, inwieweit er seinen Fahrstil hinsichtlich des Verbrauchs optimiert, oder wie sehr er von den offerierten Systemen Gebrauch macht.

Für den Einsatz solcher Assistenzsysteme im EV liegen derzeit noch kaum Ergebnisse vor. Im Anwendungsfall von Systemen zur Unterstützung des vorausschauenden Fahrens im Verbrennerfahrzeug konnte allerdings eine Treibstoffersparnis von etwa 10% nachgewiesen werden (Boriboonsomsin, Vu & Barth, 2010; Rommerskirchen, Helmbrecht & Bengler, 2014).

2.2 Fahrerverhalten und Fahrstil

Aufbauend auf der Definition der Begriffe Fahrerverhalten, Fahrverhalten und Fahrstil werden im Folgenden gängige Ansätze zur Messung und Bewertung des Fahrerverhaltens diskutiert, die entscheidenden Metriken für energieeffizientes Fahren identifiziert und deren Anwendung auf die Auswertung von Feldversuchsdaten zur Erfassung von zeitlichen Veränderungen des Fahrerverhaltens vorbereitet.



2.2.1 Verwendung der Begriffe Fahrverhalten und Fahrerverhalten

In der Literatur gibt es zwei gängige aber zu differenzierende Verwendungen für den Begriff *Fahrverhalten*. Zum einen wird darunter die fahrdynamische Reaktion des Fahrzeugs auf Fahrereingaben verstanden (vgl. Roenitz, Braess & Zomotor, 1977). Zum anderen kann mit *Fahrverhalten* auch das Verhalten des Fahrers bei Erfüllung der Fahraufgabe gemeint sein (vgl. Fastenmeier, 1995b; Neumann, Franke, Cocron, Bühler & Krems, 2015). Obwohl der Begriff *Fahrverhalten* je nach Anwenderperspektive auch im jeweiligen Bereich unmissverständlich etabliert ist, trifft im ersten Fall der Begriff *Fahrzeugverhalten* und im zweiten Fall der Begriff *Fahrerverhalten* wesentlich besser zu. Um eine Vermischung der Bedeutungen im weiteren Verlauf zu vermeiden, werden daher die Begriffe *Fahrer* – und *Fahrzeugverhalten* verwendet, die wie im Folgenden beschrieben zusammengenommen das *Fahrverhalten* des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug bestimmen. Ausgangspunkt der Fahraufgabe ist eine Zieltrajektorie, entlang derer der Fahrer das Fahrzeug bewegen möchte (vgl. Abbildung 2-4).

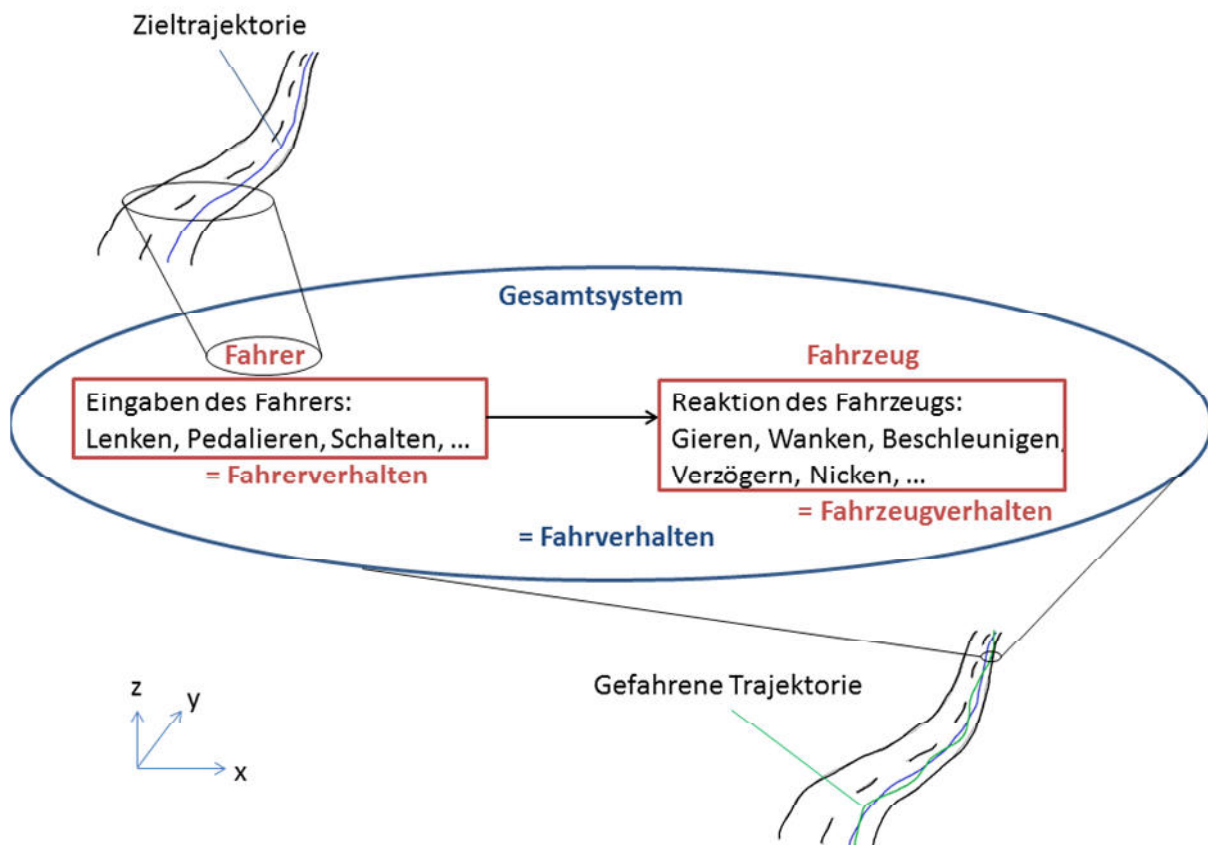


Abbildung 2-4: Veranschaulichung des Fahrer- und Fahrzeugverhaltens im Gesamtsystem aus Fahrer und Fahrzeug

Auf Eingaben des Fahrers an Lenkrad, Pedalerie und Schalthebel reagiert das Fahrzeug mit entsprechenden Positionsveränderungen in der x-y-Ebene und Drehungen um die drei Raumachsen. Die Eingaben des Fahrers zur Erreichung der Zieltrajektorie unter den vorherrschenden Umgebungs-



bedingungen stellen dabei das *Fahrerverhalten* dar, die Reaktionen des Fahrzeugs das *Fahrzeugverhalten*. Die letztlich gefahrene Trajektorie ist das Ergebnis aus Fahrereingaben und Fahrzeugreaktion. Daher muss der Begriff *Fahrverhalten* alle Größen des Fahrens berücksichtigen und somit für die gesamte Wirkungskette aus Fahrer und Fahrzeug stehen.

Während das *Fahrerverhalten* mit Größen wie Blickverhalten, Pedalbetätigung, Lenkverhalten oder Kooperationsverhalten in der Umsetzung der Trajektorienplanung messbar ist, lässt sich das *Fahrzeugverhalten* durch Größen wie Gierverhalten, Wankverhalten oder Ansprechverhalten als Umsetzung der Fahrereingaben in Bewegungsänderungen erfassen. Das *Fahrverhalten* als Gesamtprodukt aus Fahrer- und Fahrzeugverhalten ist in der letztlich gefahrenen Trajektorie und deren zeitlichem Verlauf messbar. Die entsprechenden physikalischen Größen sind also der Ort des Fahrzeugs und dessen zeitliche Ableitungen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck¹.

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Messung von Veränderungen des *Fahrerverhaltens*. Für die Zeiträume in denen die Probanden stets das gleiche Fahrzeug fahren, kann das *Fahrzeugverhalten* näherungsweise als konstant angenommen werden. Also lassen Änderungen im *Fahrverhalten* auf Änderungen im *Fahrerverhalten* rückschließen. Da hier vor allem die Energieeffizienz des *Fahrerverhaltens* im Fokus der Forschung steht, wird in dieser Arbeit bezüglich eines energieeffizienten *Fahrerverhaltens* auch von einem effizienten *Fahrstil* oder einer effizienten *Fahrweise* gesprochen, beziehungsweise ein weniger energieeffizientes aber dafür auf Erleben der Fahrdynamik ausgerichteter *Fahrerverhalten* mit einem sportlichen *Fahrstil* oder einer sportlichen *Fahrweise* gleich gesetzt.

Als maximal effizienter *Fahrstil* ist im Rahmen dieser Arbeit das *Fahrerverhalten* definiert, das unter den gegebenen Bedingungen ein Minimum an Verbrauch auf einer bestimmten Strecke ermöglicht. Ein theoretisches Optimum, um diese Strecke mit möglichst wenig Energieverbrauch zurückzulegen, wird dabei nicht weiter betrachtet. Im Gegensatz zu einem Verbrennerfahrzeug, bei dem durch einen optimalen Wirkungsgrad bei mittlerer Drehzahl und relevanter Last höhere Geschwindigkeiten effizienter sind, würde das Elektrofahrzeug seine optimale Reisegeschwindigkeit bereits bei etwa 30 km/h erreichen (AC Propulsion, 2013).

2.2.2 Messbarkeit des Fahrerverhaltens

Die Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens basiert auf den Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung, wobei je Forschungsschwerpunkt auf den entsprechenden Anwendungsfall zugeschnittene Metriken verwendet werden (vgl. Beusen et al., 2009; Feldstead, McDonald, Thorpe &

¹Der Längsruck ist ein Maß für die Veränderung der Längsbeschleunigung und wird über ihre erste zeitliche Ableitung berechnet.



Fairchild, 2011; Hjalmdahl, Almqvist & Várhelyi, 2002; Mitrovic, 2005; af Wählberg, 2006; af Wählberg, 2007).

Theoretisch können Variablen definiert werden, die speziell die Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug und dessen Umwelt betreffen. Diese können dann von der Gangwahl über die Pedalbetätigung bis hin zur Zeitlücke zu vorausfahrenden Fahrzeugen reichen. Zur Erfassung dieser Größen ist nicht nur ein aufwändiger Messaufbau mit Zugang zum Fahrzeug-Bus oder einer Fahrzeuginnenraum-Überwachung erforderlich. Auch sind diese Variablen nicht vollständig voneinander unabhängig. Beispielsweise entscheidet die Betätigung des Kupplungspedals bei einer bestimmten Geschwindigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit die Wahl des Ganges und diese wiederum die tatsächliche Ausnutzung des Drehzahlbandes.

Ericsson (2001) kombiniert deshalb einige dieser Metriken im Hinblick auf deren Aussagekraft zum effizienten Fahren zu Metavariablen (Faktoren) und listet darin wiederum die repräsentativen Messgrößen auf. Während einige dieser Faktoren wie das späte Schalten (*factor for late gear changing*) oder der Anteil der Standzeiten (*stop factor*) aufgrund der technischen Gegebenheiten des Elektrofahrzeuges für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Auswertung von keiner oder geringer Bedeutung sind, bilden andere Größen, wie die Beschleunigung (*deceleration factor*, *factor for acceleration with strong power demand* oder *extreme acceleration factor*) durchaus eine gute Basis für die Beschreibung elektrofahrzeugspezifischen Fahrerverhaltens. Laut Ericsson (2001) sind für die Energieeffizienz des Fahrens schließlich die Variablen ausschlaggebend, die die Oszillation und die Verteilung der Beschleunigung erfassen. Um bei einer Fülle an Metriken den Überblick zu erhalten, schlägt Ericsson (2001) vor, die Metriken hinsichtlich ihrer Darstellungskraft in *Level*-, *Distribution*- und *Oscillation-Measures* zu unterteilen.

In Anlehnung an diese Unterteilung stellt Tabelle 2.2 einen Überblick über die gängigen Metriken zur Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens dar, wobei nur solche Variablen ausgewählt wurden, die auch für das Elektrofahrzeug relevant sind. Dabei werden die von Ericsson (2001) betrachteten Metriken um den von Langari & Won (2005) und Murphey, Milton & Kiliaris vorgeschlagenen Variationskoeffizienten erweitert. Im Gegensatz zu der Einteilung von Ericsson (2001) sind die Standardabweichungen von Beschleunigung und Geschwindigkeit allerdings zu den *Distribution-Measures* und nicht zu den *Level-Measures* zu zählen, da sie nicht das Niveau selbst, sondern die Verteilung um ein Niveau herum beschreiben. Ursprünglich stammen die aufgeführten Metriken zwar aus Versuchen mit Verbrennerfahrzeugen, allerdings sind sie nach den theoretischen Überlegungen in Kapitel 2.1.2, wie anschließend in Abschnitt 2.2.3 aufgeführt, ebenfalls als Bewertungsgrößen für das effiziente Fahren im Elektrofahrzeug heranzuziehen.



Tabelle 2.2: Erweiterter Überblick über die Metriken des Fahrerhaltens nach Einteilung von Ericsson (2001)

| <i>Art der Metrik</i> | <i>Metrik</i> | <i>Angewandt von</i> |
|--|--|--|
| <i>Level-Measures</i> Geschwindigkeit | Mittlere Geschwindigkeit Maximale Geschwindigkeit | (Bratt & Ericsson, 2000a) (Bratt & Ericsson, 2000a) |
| <i>Level-Measures</i> Beschleunigung | Mittlere Celeration (Beschleunigungsbetrag) Mittlere positive Beschleunigung Mittlere Verzögerung Maximale Beschleunigung Maximale Verzögerung | (Alessandrini & Orecchini, 2003) (Bratt & Ericsson, 2000a) (André & Rapone, 2009) (Bratt & Ericsson, 2000a) (Bratt & Ericsson, 2000a) (Bratt & Ericsson, 2000a) |
| <i>Distribution-Measures</i> Geschwindigkeit | Standardabweichung Geschwindigkeit Zeitanteil in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen Histogramm der Geschwindigkeiten Perzentilwerte der Geschwindigkeit | (Bratt & Ericsson, 2000a) (Bratt & Ericsson, 2000a) (González, Wilby, Vinagre Diaz, Juan Jose & Sanchez Avila, 2014), (Lee & Hsu) (Sjödín & Lenner, 1995) |
| <i>Distribution-Measures</i> Beschleunigung | Standardabweichung des Beschleunigungsbetrags Zeitanteil in bestimmten Beschleunigungsbereichen Histogramm der Beschleunigung Perzentilwerte der Beschleunigung Variationskoeffizient der Beschleunigung | (Bratt & Ericsson, 2000a) (Bratt & Ericsson, 2000a) (González et al., 2014) (Hackenberg & Heißing, 1982), (Murphey et al.), (Sjödín & Lenner, 1995), (Langari & Won, 2005), (Murphey et al.) |
| <i>Distribution-Measures</i> Geschwindigkeit und Beschleunigung | Histogramm der Beschleunigung in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen | (Alessandrini & Orecchini, 2003), (André, 2004), (Dardanelli et al., 2012), (Shi, Qiu, Wang & Wang, 2011), (Viti, Hoogendoorn, van Zuylen, Wilmink & van Arem, 2008) |
| <i>Oscillation-Measures</i> Beschleunigung | Häufigkeit von Beschleunigen-Verzögerungswechsel mit bestimmten Geschwindigkeitsdifferenzen Relative positive Beschleunigung Integral der Beschleunigungsquadrate Frequenzspektrum des Beschleunigungssignals Metriken des Rucks | (Alessandrini & Orecchini, 2003) (Bratt & Ericsson, 2000a) (Bratt & Ericsson, 2000a) (Alessandrini & Orecchini, 2003) (Murphey et al.) |

2.2.3 Bestimmung der Energieeffizienz des Fahrerhaltens

Ausgehend von den Theorien zum sparsamen Fahren mit Elektrofahrzeugen (siehe Abschnitt 2.1.2) lässt sich eine energieeffiziente Fahrweise mit dem EV anhand der in Tabelle 2.3 definierten Ausprägung der aus Tabelle 2.2 ausgewählten Metriken identifizieren.



Tabelle 2.3: Voraussetzungen für energieeffizientes Fahren im Elektrofahrzeug

| Größe | Einheit | Ziel um effizient zu fahren |
|--|------------------|-----------------------------|
| Anteil mechanischer Verzögerung | % | gering |
| Anteil starker Rekuperation | % | gering |
| Anteil schwacher Rekuperation | % | hoch |
| Konstantfahrtanteil | % | hoch |
| Anteil schwacher Beschleunigung | % | hoch |
| Anteil starker Beschleunigung | % | gering |
| 95. Perzentil Beschleunigung | m/s ² | gering |
| 95. Perzentil Verzögerung ² | m/s ² | gering |
| Mittlere Celeration | m/s ² | gering |
| Standardabweichung Beschleunigung | m/s ² | gering |

Dabei entscheidet letztendlich nicht eine Metrik allein über die Energieeffizienz des Fahrerhaltens, sondern der gesamte Satz an Messgrößen, die selbst nur so weit wie möglich unabhängig sind, aber nicht immer völlig unabhängige Faktoren darstellen (Ericsson, 2001). Daraus ergibt sich zur weiteren Verwendung in der Auswertung des Feldversuchsdatensatzes folgende Anforderung.

Anforderung 1 - alle Metriken:

Eine Bewertung von Lernprozessen des elektrofahrzeugtypischen Fahrerhaltens kann nur anhand einer Gesamtbetrachtung aller relevanten Metriken durchgeführt werden.

2.2.4 Anwendung der Metriken zur Bestimmung von Veränderungen im Fahrerhalten

Sämtliche in Tabelle 2.2 aufgeführten Metriken finden ihre Anwendung in Analysen von Fahrzyklen (Alessandrini & Orecchini, 2003; Ericsson, 2000) und beziehen sich somit auf gesamte Strecken oder Streckenabschnitte. Bei der Analyse von Feldversuchen, in denen nicht alle Probanden die gleichen Strecken fahren, eignet sich eine Unterteilung der einzelnen Fahrten hinsichtlich typischer Fahrtenziele. So identifizierten Adornato et al. (2009) beispielsweise zur Auswertung eines Feldversuches mit HEVs die Ziele „nach Hause“, „zur Arbeit“ oder „zum Einkaufen“. Bereits in der Erforschung des Fahrerhaltens im ICE konnte Mitrovic (2005) feststellen, dass Fahrer auf ähnlichen Routen ähnliches Verhalten zeigen. Vor diesem Hintergrund muss auch die Analyse von

² betrachtet wird hier das 95. Perzentil aller Verzögerungen, d.h. ebenso mechanisches wie regeneratives Bremsen.



Lernvorgängen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Routen stattfinden. Nur so kann tatsächlich die durch Anpassung an die Gegebenheiten des EVs hervorgerufene Veränderung des Fahrerverhaltens ermittelt werden. Dabei ist allerdings nicht für alle Probanden von gleichartigen Fahrten auszugehen. Während einige Probanden bestimmte Fahrten in regelmäßigen Abständen wiederholen, ist für andere Probanden wiederum kein typisches Muster an vergleichbaren Fahrten auszumachen (Adornato et al., 2009). Außerdem variiert auch die Häufigkeit mit der entsprechende Strecken befahren werden von Proband zu Proband. Für die Auswertung der Feldversuchsdaten folgt daraus die folgende Anforderung.

Anforderung 2 - individuelle Auswertung:

Veränderungen im Fahrerverhalten können nur auf individuellem Niveau detailliert erfasst werden.

Somit beinhaltet aber eine probandenübergreifende Gesamtbetrachtung hinsichtlich der streckenbezogenen Metriken stets ein unterschiedliches Subset aus Routen. Möchte man für alle Probanden eines Feldversuches eine ganzheitliche statistische Bewertung des Fahrerverhaltens ausführen, kann dies entweder durch Anwendung der streckenbezogenen Metriken in gesonderten Versuchsfahrten auf einer für alle Probanden gleichen Referenzstrecke oder durch Analyse von stets gleichen Situationen anhand situationsbezogener Metriken erfolgen.

Voraussetzung für die Anwendung situationsbezogener Metriken ist eine möglichst gute Kenntnis der jeweiligen Situation. Optimalerweise sind dazu die Versuchsfahrzeuge mit Messtechnik wie Kamera- oder Radarsystemen zur Umfelderkennung ausgestattet. Ist dies nicht der Fall, können nur wenige aber dafür sicher zu identifizierende Situationen in die Auswertung mit einbezogen werden, die zudem eine präzise Aussage über das Fahrerverhalten zulassen. Einfachstes Beispiel ist das Anhalten des Fahrzeugs, bestehend aus der Verzögerungsphase, der Standphase und der anschließenden Beschleunigungsphase.

Akamatsu (2002) nutzt die Geschwindigkeit und den Abstand zur Haltelinie zum Zeitpunkt des Loslassens des Gaspedals zur Beschreibung des Fahrerverhaltens. Je besser diese Gleitphase ist, desto effizienter bewegt der Fahrer sein Fahrzeug (Bär, Aidel & Zöllner, 2012). Ähnlich dem Verzögern lässt sich auch anhand der Fahrzeugbeschleunigung unmittelbar nach dem Stillstand das Fahrerverhalten charakterisieren. Laut Deml, Freyer & Färber (2007) bieten dabei die ersten 0,1 bis 3,8 s des Beschleunigungsverlaufs den besten Aufschluss über die Fahrercharakteristik. Für den Fall des EVs erstellten Alessandrini, Orecchini, Ortenzi & Villatico Campbell (2009) Histogramme für die Beschleunigungswerte und stellten dabei fest, dass die Anfahrbeschleunigung mit $2,25 \text{ m/s}^2$ typischerweise stärker ausfällt, als im Verbrennerfahrzeug. Ein energieeffizientes Fahrerverhalten kann demnach für Anhalte- und Anfahrmanövern anhand der in Tabelle 2.4 definierten Metriken identifiziert werden.



Tabelle 2.4 Identifikation von energieeffizientem Fahren im Elektrofahrzeug in Anhalte- und Anfahrmanövern

| Größe | Einheit | Ziel um effizient zu fahren |
|--|------------------|-----------------------------|
| Anteil mechanischer Verzögerung | % | gering |
| Anteil starker Rekuperation | % | gering |
| Anteil schwacher Rekuperation | % | hoch |
| Maximum der Verzögerung | m/s ² | gering |
| Median der Verzögerung | m/s ² | gering |
| Standardabweichung der Verzögerung | m/s ² | gering |
| Geschwindigkeit zu Rekuperationsbeginn | m/s | hoch |
| Dauer der Rekuperationsphase | s | hoch |
| Anteil starker Beschleunigung | % | gering |
| Anteil schwacher Beschleunigung | % | hoch |
| Maximum der Beschleunigung | m/s ² | gering |
| Median der Beschleunigung | m/s ² | gering |
| Standardabweichung Beschleunigung | m/s ² | gering |

2.3 Einflüsse auf das Fahrerverhalten

Dass das Fahrerverhalten keine Personenkonstante ist, sondern mit einer Vielzahl an Einflussgrößen variiert, wird besonders deutlich von Murphey et al. hervorgehoben. Deswegen ist es auch völlig unzureichend von einem *Fahrertypen* zu sprechen, der jederzeit dasselbe Fahrerverhalten annimmt. Vielmehr trifft hier der Begriff *Fahrstil* zu, der das zu einem bestimmten Zeitpunkt unter gewissen Bedingungen gezeigte Fahrerverhalten beschreibt.

Die prinzipiellen Einflussgrößen auf das Fahrerverhalten lassen sich analog zur Systembetrachtung Fahrer-Fahrzeug-Umwelt in fahrerbedingte, fahrzeugbedingte und umweltbedingte Einflüsse unterteilen. Alle Einflussgrößen zusammen bestimmen, wie in Abschnitt 2.3.4 gezeigt, das letztlich umgesetzte Fahrerverhalten. Im Folgenden wird zunächst für den allgemeinen Fall auf diese einzelnen Größen eingegangen, um diese anschließend im Spezialfall des Elektrofahrzeuges genauer zu betrachten.

2.3.1 Einfluss von Motivation und Kompetenz auf das Fahrerverhalten

Sowohl der Stress, der durch die begrenzte Reichweite erzeugt werden kann (vgl. Rauh et al., 2015), als auch die Freude am starken und kontinuierlichen Beschleunigen (vgl. Neumann et al., 2015)



beeinflussen die Ausprägung und damit die Effizienz des Fahrerhaltens maßgeblich. In diesem Spannungsfeld aus Freude und Stress entscheiden letztlich die persönliche Motivation (*Wollen*) und die individuelle Kompetenz (*Wissen* und *Können*) des Fahrers über eine erfolgreiche Anwendung eines effizienten Fahrstils (vgl. in Kapitel 2.1.3). Während sich die Kompetenz aus der Kenntnis der theoretischen Zusammenhänge und der Übung in deren Umsetzung bestimmen lässt, ist die Motivation nicht in einer einzigen Größe zu erfassen. Im Falle des energieeffizienten Fahrens im Elektrofahrzeug spielt hier laut Neumann (2015) neben den rationalen Komponenten vor allem der hedonische Wert eine bedeutende Rolle. Dabei kann es sowohl die Freude am sportlichen Fahren, wie auch die Freude an umweltfreundlichen Verhalten sein, die das Fahrerverhalten bestimmen (Neumann, 2015).

Bezüglich der Kompetenz konnten Neumann et al. (2015) einen Zuwachs des *Wissens* bezüglich energieeffizienten Fahrens mit zunehmender Fahrerfahrung im Elektrofahrzeug nachweisen. Eine konkrete Umsetzung dieses *Wissens* auf das alltägliche Fahrerverhalten wurde allerdings nicht untersucht.

2.3.2 Fahrzeugbedingte Einflüsse auf das Fahrerverhalten

In der Betrachtung des Fahrer-Fahrzeug-Systems, wie in Kapitel 2.4.3 dargestellt, fällt den Fahrzeugeigenschaften eine grundlegende Rolle im Mensch-Maschine-Regelkreis zu. Zum einen werden die Eingaben des Fahrers abhängig von der Gestaltung der Benutzerschnittstelle an die Fahrzeugfunktionen übergeben, wobei der Fahrer aber bereits bei der Betätigung der Bedienelemente eine direkte Rückmeldung bekommt.

Zum anderen wirken die fahrzeugtypische Antriebscharakteristik und Assistenzsysteme auf den Rückkopplungspfad der Regelstrecke und somit indirekt auf die Wahrnehmung des Fahrers ein (vgl. Abbildung 2-5).

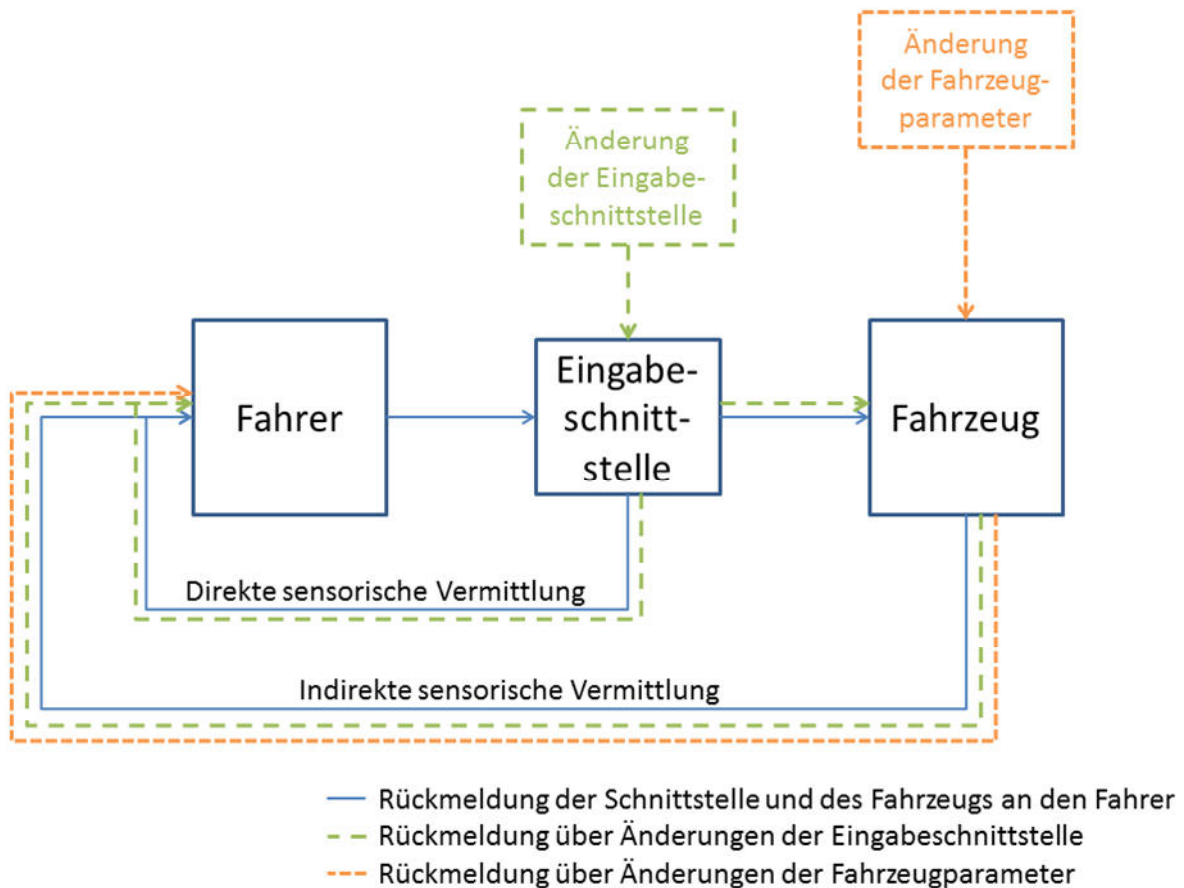


Abbildung 2-5: Abhängigkeiten im Fahrer-Fahrzeug-System (nach Bald, 1987; Jürgensohn, 2001 und Mitschke & Wallentowitz, 2014)

Beispiele aus der Literatur zeigen, dass im Verbrennerfahrzeug eine höhere Motorisierung eines Fahrzeuges tendenziell zu stärkerem Beschleunigen und schnellerem Fahren führt (Bald, 1987; Quimby, Maycock, Palmer & Buttress, 1999; Ruwenstroth, Kuller & Radder, 1989). Ob dies bei alltäglicher Nutzung eines Elektrofahrzeugs auch der Fall ist, konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Möglicherweise ist nicht die Antriebscharakteristik, sondern eher die Rahmenbedingungen, unter denen das Fahrzeug bewegt wird, für den letztlich gewählten Kompromiss aus sportlichem Fahren und Reichweitenausnutzung entscheidend.

2.3.3 Umgebungsbedingte Einflüsse auf das Fahrerverhalten

Als wesentliche umgebungsbedingte Einflussgröße ist die Streckencharakteristik zusammen mit dem tageszeitabhängigen Verkehrsaufkommen zu nennen. Feldversuche mit Verbrennerfahrzeugen haben gezeigt, dass die Beschaffenheit der Strecke maßgeblich die gefahrene Geschwindigkeit (Quimby et al., 1999) und das Beschleunigungsverhalten (Bratt & Ericsson, 2000b) bestimmt. Auch limitiert der umgebende Verkehr die Fahrzeugbewegung und setzt der freien Entfaltung eines Fahrstils somit Grenzen.



Bezüglich der Untersuchung von Veränderungen im Fahrerverhalten mit einem EV bedeutet dies, dass manche Effekte, die beispielsweise durch hohe Dynamikanforderungen im Stadtverkehr erzeugt werden, die Entwicklung eines EV-optimierten Fahrstils überlagern. So ist es gerade im Stadtverkehr vorstellbar, dass Fahrer stark beschleunigen und bremsen, um ihre Position im Verkehrsfluss beizubehalten, was zwar zu einem erhöhten Energieverbrauch führt, gerade aber bei den geringen Tageskilometerleistungen im Stadtverkehr unkritisch hinsichtlich des Reichweitenstresses ist. Dies muss auch bei der Auswertung der Feldversuchsdaten berücksichtigt werden.

Anforderung 3 - Einfluss der Strecke:

Um Veränderungen im Fahrerverhalten analysieren zu können, ist der Einfluss der Strecke und des Verkehrs soweit wie möglich zu eliminieren.

Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass die Auswertung gezielt für Fahrten auf vergleichbaren Strecken zu vergleichbaren Uhrzeiten durchgeführt wird. So sind Streckencharakteristik und Verkehrsaufkommen mit hoher Wahrscheinlichkeit zeitliche Konstanten.

2.3.4 Einflussgrößen auf das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug

Zusammenfassend aus den in vorigen Abschnitten 2.3.1 bis 2.3.3 diskutierten Einflussgrößen des Fahrerverhaltens lassen sich die für die Anpassung des Fahrerverhaltens an das Elektrofahrzeug besonders bedeutenden Größen herausgreifen (siehe Abbildung 2-6).

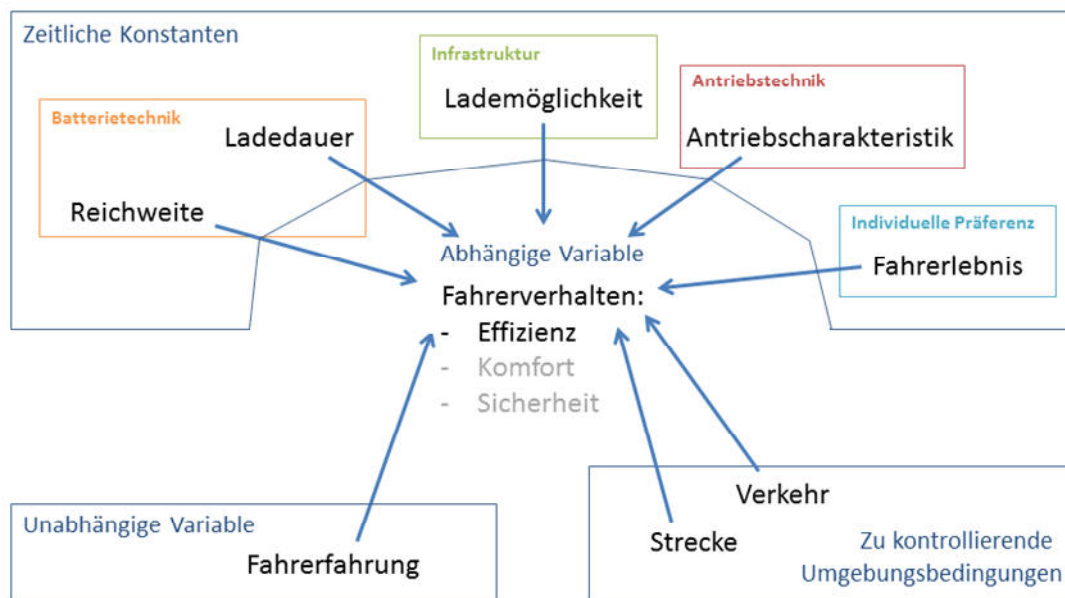


Abbildung 2-6: Einflussgrößen auf das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug

Die Fahrzeugkomponenten der Batterie- und Antriebstechnik können ebenso wie die Infrastruktur und die individuelle Präferenz bezüglich des Fahrerlebnisempfindens für den Zeitraum eines Feldversuches als Konstanten angenommen werden. Somit bleiben der Verkehr und die Strecke durch



geeignetes versuchsmethodisches Vorgehen als zu kontrollierende Umgebungsbedingung übrig. Letztlich lassen sich dann alle noch messbaren zeitlichen Veränderungen der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens auf die Fahrerfahrung im Umgang mit dem Elektrofahrzeug zurückführen.

2.4 Beschreibung von Lernprozessen im Fahrerverhalten

Aufbauend auf Lerntheorien zur menschlichen Interaktion mit Technik, werden aktuelle Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Elektromobilität vorgestellt und schließlich ein Ansatz zur Einordnung von Lernprozessen im Fahrerverhalten in die gängigen Modelle des Fahrer-Fahrzeug-Systems vorgeschlagen.

2.4.1 Psychologie des Lernens – menschliches Verhalten in der Interaktion mit Technik

Es ist davon auszugehen, dass der Fahrer sich nicht in Form einer sensomotorischen Adaptation, sondern als Folge von prozeduralen Lernvorgängen, wie sie in Franke et al. (2012b) oder Cocron (2014) beschrieben werden, an das Elektrofahrzeug gewöhnt. In diesen Modellen passt sich der Fahrer durch eine wiederholte Auseinandersetzung mit dem Elektrofahrzeug an dessen Systemverhalten an und optimiert dabei schrittweise seine Strategien im Umgang mit den zu Beginn unbekanntem nutzungsbedingten oder fahrdynamischen Eigenschaften. Im Gegensatz zur rein sensomotorischen Adaptation finden diese Lernprozesse auf Basis eines Erfahrungsschatzes statt (Merz, 1981), was wiederum eine kognitive Leistung in Form von Entscheidungsprozessen unter Einbeziehung von Informationen aus dem Langzeitgedächtnis voraussetzt.

Theoretischer Ausgangspunkt für die Erklärung von Lernvorgängen ist das Informationsverarbeitungsmodell nach Wickens, Gordon & Liu (2004). Dieses geht davon aus, dass aufgenommene Reize mit im Langzeitgedächtnis gespeicherten Informationen verglichen werden und schließlich durch Entscheidungsfindung im Arbeitsgedächtnis zur Ausführung konkreter Handlungen führen. Ein wiederholtes Durchlaufen dieser Schleife erweitert den Erfahrungsschatz schrittweise um die erkennbaren Auswirkungen des Handelns und ermöglicht somit eine Verbesserung der Fähigkeiten.

Nach Fitts & Posner (1967) lässt sich der menschliche Lernprozess in die drei Phasen der kognitiven, assoziativen und autonomen Auseinandersetzung mit dem zunächst unbekanntem Sachverhalt untergliedern. Während in der kognitiven Phase eine mögliche Herangehensweise durch Anwendung bekannter Muster aus vergleichbaren Fällen erprobt wird, beschäftigt sich der Lernende in der assoziativen Phase bereits mit der Optimierung der in der ersten Phase erfolgreich angewandten Lösungsstrategien. In der dritten Phase sind die neu erlernten Verhaltensmuster bereits soweit eingepreßt, dass der Umgang mit dem ursprünglich neuen System weitgehend automatisiert ist und somit kaum noch kognitive Ressourcen erfordert. Eine Optimierung des Verhaltens findet nur noch in sehr kleinem Ausmaß statt.



In einem Datensatz beliebiger Metrik lässt sich ein Lernvorgang entsprechend der drei Phasen nach Fitts & Posner (1967) durch Einpassung einer in ihrer zweiten Ableitung stetig abnehmenden, also abklingenden, Funktion finden. Mit der Annahme, dass der Lernvorgang in einem endlichen Zeitraum, also bei einer endlichen Anzahl an Wiederholungen abgeschlossen ist, muss diese Funktion zudem in ihrer zweiten und ersten Ableitung gegen Null konvergieren. Diese Annahme der Abgeschlossenheit eines Lernvorgangs in endlicher Zeit beruht zum einen auf physikalischen Grenzen und zum anderen auf dem parallel zum Lernen stattfindenden Vergessen (Anderson, Fincham & Douglass, 1999; Ebbinghaus, 1885). Newell & Rosenbloom (1981) schlagen zur Beschreibung von Fortschritten im Lernprozess das Powerlaw of Practice vor. Es bildet den Zusammenhang zwischen der Bearbeitungszeit T und der Anzahl an Wiederholungen N einer Aufgabe durch eine Power-Funktion der Form:

$$T = B \cdot N^b + c$$

mit dem Grenzwert c , der Zeitkonstante b und dem Streckungsfaktor B ab. Auch wenn die Anwendbarkeit dieses Powerlaw of Practice nicht zweifelsfrei für beliebige Lernvorgänge nachgewiesen werden konnte (Brown, S., Heathcote, A., 2003), erfüllt sie dennoch die grundlegenden Anforderungen an die Lerntheorie und ist auch eine gängige Herangehensweise im Kontext des Erlernens des Umgangs mit technischen Systemen, wie beispielsweise in Cocron (2014) gezeigt.

2.4.2 Lernen im Anwendungsfall Elektromobilität

Wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben, gehen die Theorien zu menschlichen Lernprozessen im Umgang mit unbekannter Technik davon aus, dass sich der Nutzer durch wiederholtes Auseinandersetzen mit dem System Strategien zum optimalen Umgang erarbeitet. Im Kontext des Elektrofahrzeuges ist die Beeinflussung der Reichweite durch den Fahrstil als der unbekannteste technische Zusammenhang zu sehen, mit dem die Neunutzer von Elektrofahrzeugen sich während des Gewöhnungsprozesses auseinandersetzen haben. Inwiefern die eigene Fahrweise die Reichweite beeinflusst, somit also auch über die Nutzbarkeit des Elektrofahrzeuges entscheidet, ist zunächst nicht bekannt, sondern muss durch praktische Erfahrung in Form regelmäßig wiederholter Fahrten mit dem Elektrofahrzeug erlernt werden.

Ohne weiter auf die Vielzahl der Studien (u.a. Stevens, Brusque & Krems, 2014 oder Wege, Pereira, Victor & Krems, 2014) einzugehen, die die Verhaltensanpassung im Zusammenhang mit technischen Systemen im automobilen Kontext behandeln, werden hier die MINI E Feldversuche von Cocron et al. (2013) und Franke (2014) als repräsentative Literaturbeispiele herausgegriffen.

Cocron et al. (2013) wendeten das Powerlaw of Practice auf das Erlernen des Umgangs mit der im Fahrpedal integrierten Rekuperationsfunktion an. Sie konnten dabei für eine Stichprobe von 37 Elektrofahrzeugnutzern bezüglich der definierten Verzögerungsparameter B_{man} (Anzahl mechanischer



Bremsmanöver auf 100 km) und B_{prop} (Zeitanteil mechanischen Bremsens an der gesamten Verzögerungsdauer) eine „typische Lernkurve entsprechend des Powerlaw of Practice“ mit Werten für den relativen RMSE im Bereich von 0,22 bis 1,3 feststellen (vgl. Cocron et al., 2013; Abbildung 2-7).

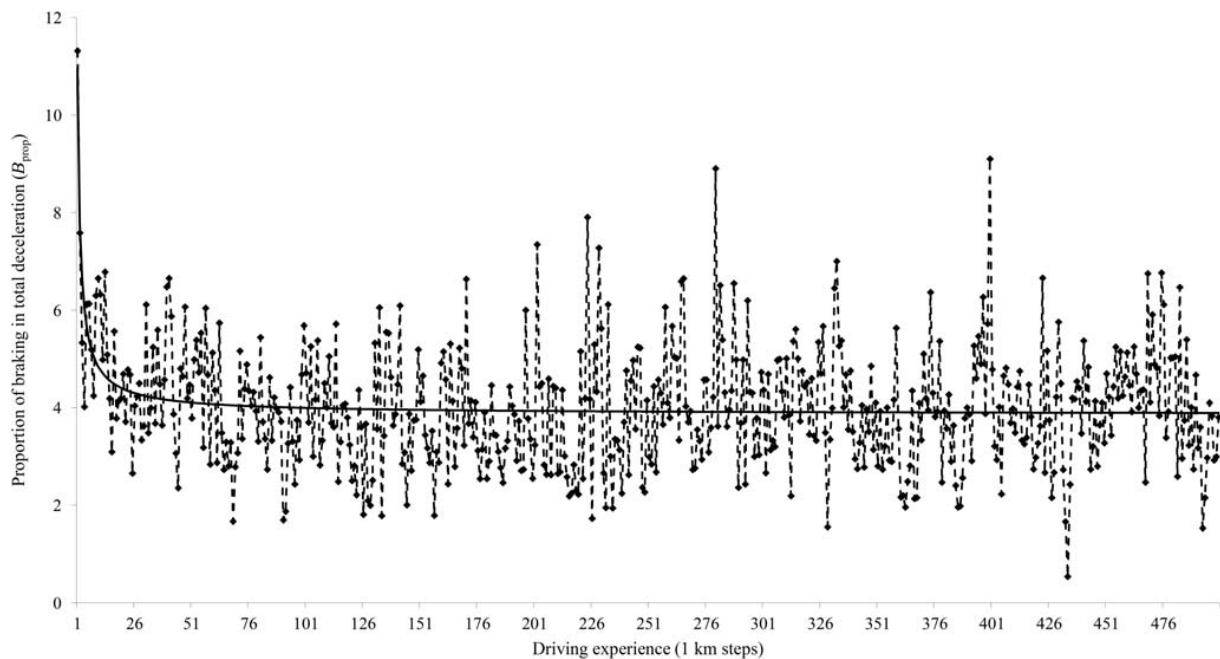


Abbildung 2-7: Verlauf der Lernkurve des Anteils der Bremsbetätigung (Cocron et al., 2013)

Während das Erlernen der im Fahrpedal implementierten Rekuperation eine gewisse sensomotorische Komponente aufweist, ist der generelle Umgang mit der begrenzten Reichweite zunächst vor allem mit kognitiver Leistung verbunden. Die Tendenz die begrenzte Reichweite zunehmend auszureizen beruht nach Franke (2014) auf einem Zuwachs an als komfortabel empfundener Reichweite. Dieser Zuwachs an komfortabler Reichweite ist wiederum das Produkt eines Lernprozesses an täglichen Wiederholungen des Umgangs mit dem EV (Franke & Krems, 2013; Franke et al., 2012b). Aufbauend auf den Erkenntnissen von Labeye et al. (2012) lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass die Fahrer der Reichweitenbeschränkung durch eine stetige Effizienzsteigerung ihrer Fahrweise begegnen. Folglich müsste das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug als Funktion der Fahrerfahrung mit dem Verlauf einer Lernkurve beschreibbar sein, die sich einem individuellen Optimum an energieeffizientem Fahren annähert.

Wie auch von Franke (2014) beschrieben, ist bei der Untersuchung von Lernvorgängen im Umgang mit der begrenzten Reichweite ein im Vergleich zur klassischen Lerntheorie stark verlängerter Rückmeldezeitraum zu berücksichtigen. Effekte der Fahrweise auf die verfügbare Reichweite sind nicht im Sekundenzeitraum, sondern in der Regel erst im Anschluss an eine Fahrt festzustellen. Als eine Wiederholungsbasis für die generelle Untersuchung von Lernvorgängen kann demnach die Anzahl der absolvierten Fahrten gewählt werden. Da allerdings manche Aspekte, wie beispielweise das starke Beschleunigen aus dem Stillstand oder das Rekuperieren nicht von der Anzahl



der Fahrten abhängen, sondern vielmehr mit jeder einzelnen Durchführung der entsprechenden Manöver erlebt und angewandt werden, ist es zwingend notwendig, die Gesamtbetrachtung um eine manöverbasierte Analyse von zeitlichen Änderungen zu erweitern.

Der zeitliche Rahmen für Lernprozesse im Fahrerverhalten ist nach bisherigem Kenntnisstand nicht abschließend geklärt. Während Cocron et al. (2013) feststellen konnten, dass der Lernprozess im Umgang mit der Rekuperationsfunktion innerhalb der ersten 50 km, also in weniger als einer Stunde Fahrt, abgeschlossen ist, beziehen sich Franke et al. (2012a) auf einen Zeitraum mehrerer Monate. Übergreifend betrachtet scheinen demnach die den Einsatz der Rekuperation betreffenden Lernprozesse deutlich schneller zu verlaufen, als die generell durch die Reichweitenproblematik beeinflussten. Außerdem darf die Tatsache nicht vernachlässigt werden, dass das Spannungsfeld aus begrenzter Reichweite und animierender Fahrdynamik auf einem Level mit weitaus höherer kognitiver Beanspruchung liegt als das von Cocron (2014) untersuchte Erlernen des optimalen Einsatzes der Rekuperationsfunktion. Der Lernprozess mit dem Ziel einer möglichst energieeffizienten Fahrweise auf alltäglich durchgeführten Fahrten soll anhand des Fahrer-Fahrzeug-Modells im folgenden Abschnitt genauer dargestellt werden.

2.4.3 Einordnung der Lernprozesse in das Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe

Der Ablauf von Veränderungen im Fahrerverhalten als Folge der technisch bedingten Besonderheiten eines Elektrofahrzeuges kann anhand der Betrachtung des Fahrers als Regler im Fahrer-Fahrzeug-System in das Konstrukt der Fahraufgabe eingeordnet werden. Vereint man die Modelle nach Bald (1987), Marienfeld (1970) oder Mitschke & Wallentowitz (2014), so ist davon auszugehen, dass der Fahrer, wie in Abbildung 2-8 dargestellt, als Regler die Führungsgrößen in Stellgrößen umgesetzt über die Peripherie (Pedale, Lenkrad) an das Fahrzeug weitergibt.

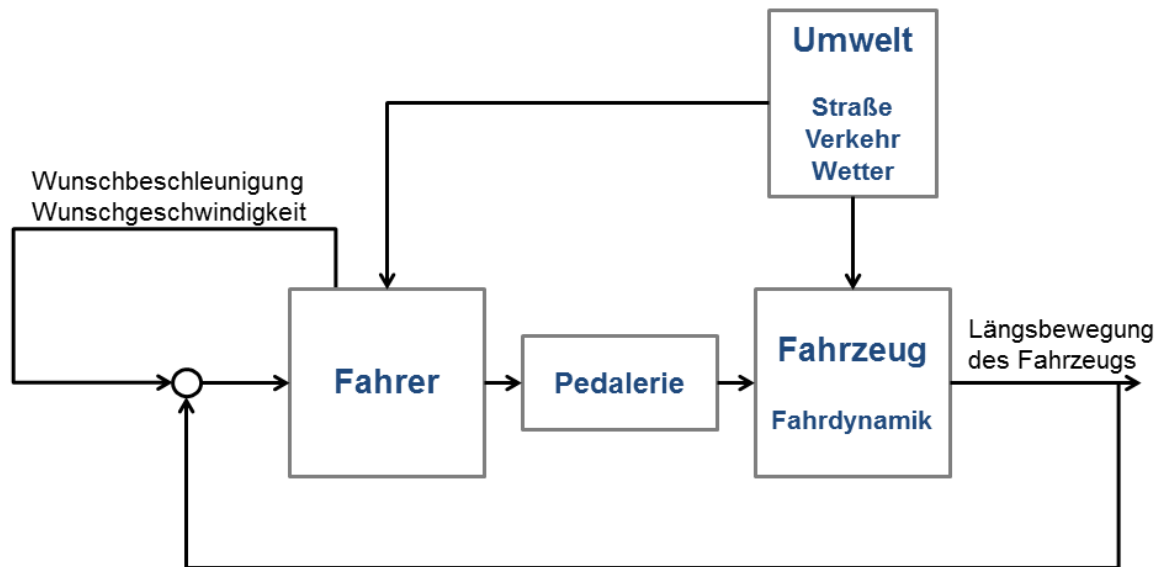


Abbildung 2-8: Der Fahrer als Regler im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis (nach Bald (1987), Marienfeld (1970) und Mitschke & Wallentowitz (2014))

Dabei ist im längsdynamischen Fall nicht nur wie von Bald (1987) angenommen, von einer Wunschgeschwindigkeit auszugehen, sondern auch die Wunschbeschleunigungen (vgl. Mitschke & Wallentowitz, 2014 oder Dai, Zhang & Lu, 2012) als Regelgröße mit aufzunehmen. Das Fahrzeug wiederum reagiert als Regelstrecke mit seinem spezifischen Verhalten auf die Eingaben des Fahrers, wobei die Umwelteinflüsse aus Wetter, Verkehr oder Straßenbeschaffenheit als Störgrößen in den Regelkreis einwirken. Über seine Sinnesorgane erhält der Mensch optisch, haptisch und akustisch Rückmeldung, wodurch der Regelkreis geschlossen wird. Nach Mitschke & Chen, Z. (1991) übernimmt der Fahrer dabei die Funktion eines adaptiven Reglers, der sich iterativ auf Veränderungen in der Regelstrecke und den Umweltstörgrößen anpasst.

Wendet man dieses Modell auf die technischen Besonderheiten eines Elektrofahrzeuges an, so bedeutet dies, dass beispielweise eine sportlichere Antriebscharakteristik zu einem dynamischeren Verhalten der Regelstrecke führt, was durch entsprechend dynamischere Eingaben des Fahrers zu einer höheren Gesamtsystemdynamik führen kann. Dies wiederum würde als deutlich sportlicheres Fahrerverhalten erkennbar. Da wie in Marienfeld (1970) ausgeführt, diese Anpassung des Menschen an eine geänderte Regelstrecke nicht unmittelbar erfolgt, sondern Resultat eines mehrfachen Durchlaufen des Regelkreises ist, kann in diesem Zusammenhang von einem Lernprozess ausgegangen werden. Dieses Modell des Regelkreises deckt allerdings im Wesentlichen nur die senso-motorische Ebene der Fahraufgabe ab. Deswegen ist eine Erweiterung anhand des Drei-Ebenen-Modells der Fahraufgabe nach Donges (1982) in Kombination mit dem Drei-Ebenen-Modell des Fähigkeitserwerbs nach Rasmussen (1983) unumgänglich. Die Kombination dieser Modelle wurde bereits von Michon



(1985) eingeführt und auch schon von Labeye et al. (2012) und Cocron (2014) im Kontext der Elektromobilität angewandt.

Um allerdings den Einfluss der Umwelt weiterhin als Störgröße und nicht als Teil der Regelstrecke betrachten zu können wird dieses Modell wie in Abbildung 2-9 dargestellt modifiziert und zur Übersichtlichkeit auf die Fahrzeuglängsdynamik beschränkt.

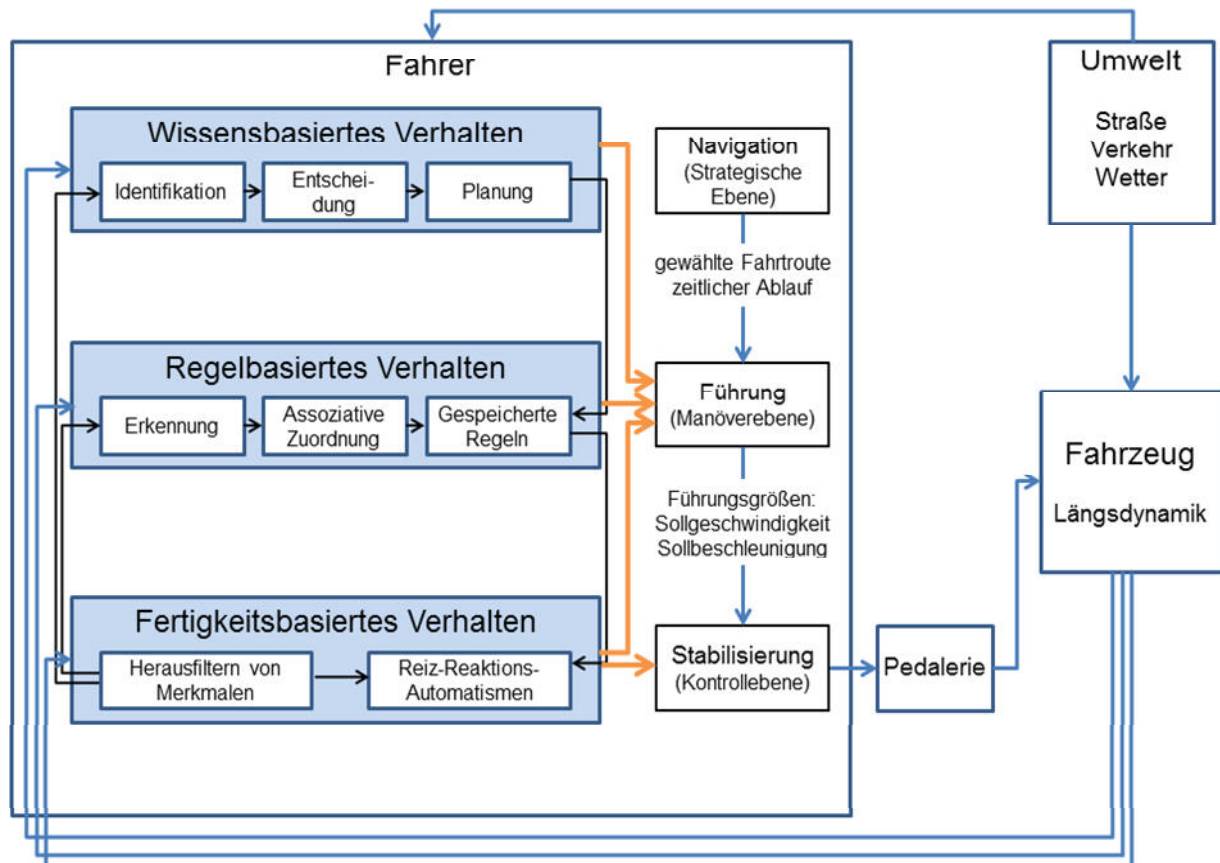


Abbildung 2-9: Für die Untersuchung von Fahrerverhaltensänderungen bei alltäglicher Nutzung eines Elektrofahrzeuges modifizierte Kombination aus Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe und Drei-Ebenen-Modell des Fähigkeitserwerbs (Michon, 1985)

Anhand dieses Modells lassen sich nun einerseits der Einfluss der begrenzten Reichweite und andererseits der Effekt der dynamischen Antriebscharakteristik des EVs auf das Fahrerverhalten theoretisch erfassen. Prinzipiell ist bezüglich beider Faktoren davon auszugehen, dass der Lernprozess nach der Theorie von Rasmussen (1983) zunächst auf der Ebene des wissensbasierten Verhaltens mit der bewussten Entscheidung zur mehr oder weniger starken Ausnutzung der begrenzten Reichweite beginnt. Mit zunehmender Fahrerfahrung auf wiederkehrenden Strecken und der damit verbundenen regelmäßigen Rückmeldung über die Beeinflussung der Reichweite durch mehr oder weniger effizientes Fahrerverhalten festigen sich die Verhaltensmuster und gehen in regelbasiertes Verhalten



über. Schließlich sollte nach Abschluss des Lernprozesses das EV-typische Fahrerverhalten in fertigkeitbasierte Verhaltensmuster münden.

Hinsichtlich der Ebenen der Fahraufgabe findet laut Franke (2014) die Auseinandersetzung mit der begrenzten Reichweite vor allem auf der strategischen Ebene und weniger auf der Kontroll- oder Manöverebene statt. Dies trifft sicherlich für die prinzipielle Planung von Routen und Ladevorgängen zu, vernachlässigt aber die Tatsache, dass auch während der Fahrt durch effizienz-optimiertes Verhalten auf der Manöverebene Reichweite gut gemacht werden kann. Ein Lernprozess mit dem Ziel der optimalen Ausnutzung der begrenzten Reichweite durch optimiertes Fahrerverhalten wäre sogar allein auf der Manöverebene zu finden. Ebenso verlaufen Anpassungen im Fahrerverhalten an das ungewohnte Fahrzeugverhalten des EVs im Wesentlichen auf der Manöverebene. Änderungen des Fahrverhaltens, wie stärkeres Beschleunigen oder Verzögern, müssen durch entsprechend geänderte Führungsgrößen als Output aus dem Manöverlevel des Fahrers kommen.



3 Forschungsfragen und Hypothesen

Wie in Kapitel 2 beschrieben, können die fahrdynamische Charakteristik des EVs und weitere Nutzungsbedingungen, wie die begrenzte Reichweite, einen Einfluss auf das Fahrerverhalten haben. Zusammen mit der Theorie des Erlernens von Fähigkeiten im Umgang mit unbekanntem technischen Systemen und den Ergebnissen bisheriger Nutzerstudien mit Elektrofahrzeugen bietet dies die Grundlage für die Annahme, dass sich Fahrer mit zunehmender Fahrerfahrung an die fahrdynamischen und nutzungsbedingten Charakteristika eines Elektrofahrzeuges anpassen, als dass sie Strategien zum reichweitenoptimierten Fahren erlernen und umsetzen. Dies würde bedeuten, dass sie ihr Fahrerverhalten hinsichtlich der Energieeffizienz von Fahrt zu Fahrt optimieren.

Das Fahrerverhalten hängt allerdings nicht nur von der Fahrzeugcharakteristik, sondern auch von individuellen Präferenzen des Fahrers bezüglich der Wahl von Fahrstilen ab und wird darüber hinaus von Umgebungsbedingungen, wie Streckencharakteristik und Verkehr, beeinflusst. Deswegen sind diese Störgrößen so weit wie möglich zu kontrollieren oder deren Einflüsse zu minimieren (vgl. **Anforderung 2** und **Anforderung 3** aus Kapitel 2). Dies geschieht durch Unterteilung in vier Forschungsfragen, die im Weiteren getrennt voneinander untersucht werden. Während zunächst über den gesamten Probandendurchschnitt feststellbare Änderungen des Fahrerverhaltens untersucht werden (Forschungsfrage 3.1), geht Forschungsfrage 3.2 präziser auf die individuellen Rahmenbedingungen ein. Forschungsfrage 3.3 behandelt den Einfluss des zwischenzeitlichen Rückwechsels auf Verbrennerfahrzeuge und Forschungsfrage 3.4 das von allen Probanden auf einer gemeinsamen Referenzstrecke erzielbare Einsparpotential durch optimiertes Fahrerverhalten (siehe Abbildung 3-1).

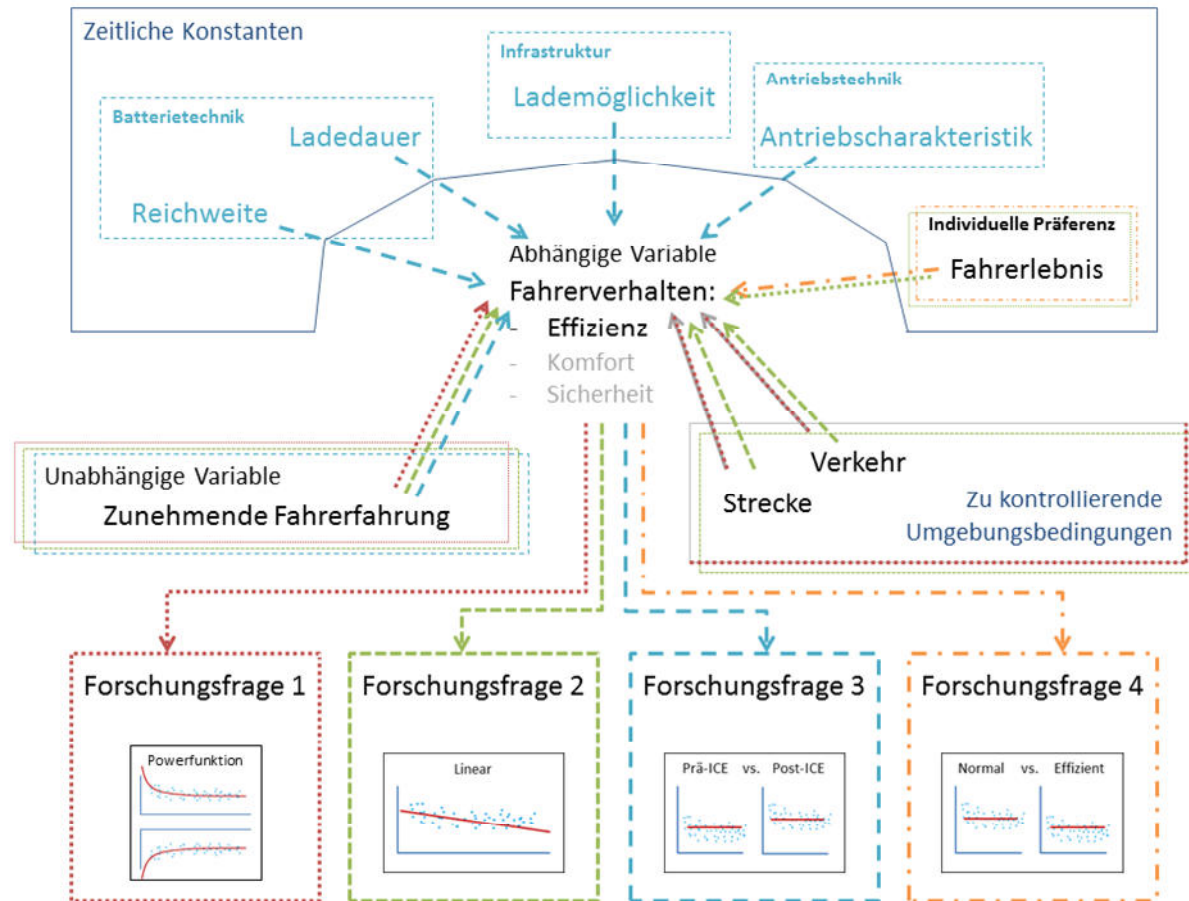


Abbildung 3-1: Aufbau der Forschungsfragen als Folge gezielter Variation der Einflussgrößen auf das Fahrerverhalten im EV

Durch eine Zusammenfassung der Teilergebnisse in Kapitel 6 kann abschließend wieder eine zusammenhängende Aussage als Anhaltspunkt für die Konzeption zukünftiger Elektrofahrzeuge gewonnen werden.

3.1 Optimieren die Fahrer von Elektrofahrzeugen ihr Fahrerverhalten hinsichtlich der Energieeffizienz?

Von der Annahme ausgehend, dass Veränderungen im Fahrerverhalten Folge prozeduralen Lernens sind, dessen Ziel die optimale Ausnutzung der begrenzten Reichweite ist (Franke et al., 2012a; Labeye, Adrian, Hugot, Regan & Brusque, 2013; Neumann, 2015), liegt die Vermutung nahe, dass dieser Lernprozess sich in Form eines von Fahrt zu Fahrt zunehmend verbrauchsoptimierten Fahrerverhaltens fahrdynamisch erfassen lässt.

Wenn die zugehörige Lernkurve unabhängig von individuellen Rahmenbedingungen für alle Probanden gleichermaßen verläuft, dann ist sie auch über den gesamten Probandendurchschnitt nachzuweisen.

**Hypothese 1:**

Fahrer von Elektrofahrzeugen wenden mit zunehmender Fahrerfahrung ein effizientes Fahrerverhalten an.

Da, wie in Kapitel 2.2.2 dargestellt, die Energieeffizienz des Fahrerverhaltens nicht einzig in einer Größe erfasst werden kann, wird diese Hypothese anhand eines Satzes möglichst unabhängiger Metriken überprüft, die in Kapitel 4.7.1 genauer definiert werden. Zusätzlich zu den streckenbezogenen Metriken werden weitere manöverbezogene Metriken betrachtet. Dies hat den Vorteil, dass das Fahrerverhalten in besonders effizienzkritischen Manövern isoliert von weniger bedeutenden Situationen ausgewertet werden kann.

3.2 Welcher Zusammenhang besteht zwischen den zeitlichen Veränderungen im Fahrerverhalten und individuellen Einflussgrößen?

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass Lernprozesse wie in Kapitel 2.3 beschrieben durch individuelle Rahmenbedingungen wie Motivation und Streckencharakteristik beeinflusst werden und somit nicht pauschal für alle Probanden erfasst werden können. Es ist beispielsweise möglich, dass Probanden zu unterschiedlichen Fahrtenzielen mit unterschiedlicher Motivation aufbrechen. Außerdem gibt die limitierte Reichweite auf kurzen innerstädtischen Fahrten weit weniger Grund sparsam zu fahren, als auf längeren Autobahnfahrten. Um den Einfluss solcher Rahmenbedingungen explorativ zu untersuchen, wird das Fahrerverhalten probandenindividuell ausgewertet und die Abhängigkeit von Veränderungen im Fahrerverhalten zu den Streckenbedingungen untersucht. Die hierzu aufgestellte Hypothese lautet:

Hypothese 2:

Veränderungen im Fahrerverhalten sind abhängig von der individuellen Streckenlänge, der Art des Streckentyps und der Fahrtrichtung.

Ebenso wie in Forschungsfrage 3.1 wird diese Hypothese anhand eines Metrikensatzes zur Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens überprüft. Dieser wird allerdings nun für vergleichbare Fahrten eines jeden Probanden individuell angewandt. Die so gewonnenen Ergebnisse werden in Bezug zur jeweiligen Streckenlänge, zum Streckentyp (Autobahn, Landstraße, Stadt) und zum Fahrtziel gesetzt.

3.3 Hat die zwischenzeitliche Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges einen Einfluss auf den Fahrstil im Elektrofahrzeug?

Außerdem bleibt noch der Einfluss der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges auf eventuelle Veränderungen im Fahrerverhalten zu betrachten. Nach den in Kapitel 2.4 beschriebenen Theorien, könnte aufgrund der Einflüsse durch Vergessen und Verlernen der Rückwechsel auf ein



Verbrennerfahrzeug zu einer Unterbrechung des Lernvorgangs führen oder diesen gar umkehren. Falls dies der Fall ist, wäre nach Unterbrechung durch eine Fahrt im Verbrennerfahrzeug das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug messbar schlechter in der Energieeffizienz (siehe Abbildung 3-2).

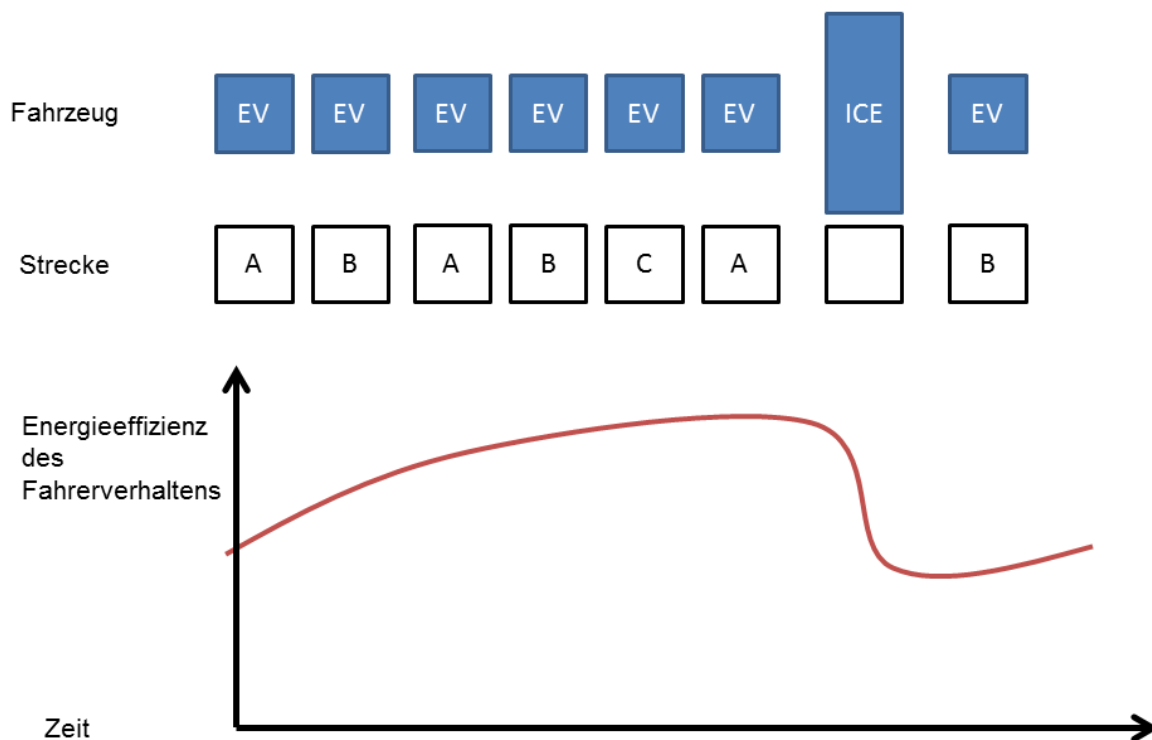


Abbildung 3-2: mögliche Beeinflussung des Erlernens eines energieeffizienten Fahrstiles im EV durch zwischenzeitliche Nutzung eines ICE

Die hierzu aufgestellte Hypothese lautet:

Hypothese 3:

Die zwischenzeitliche Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges führt zu einem weniger effizienten Fahrstil in den darauf folgenden Fahrten im Elektrofahrzeug.

Zur Überprüfung dieser Hypothese wird das Fahrerverhalten auf der ersten Fahrt im EV nachdem zuvor im Verbrennerfahrzeug gefahren wurde (Post-ICE-Fahrt) mit dem auf der letzten Fahrt im EV bevor ICE gefahren wurde (Prä-ICE-Fahrt) verglichen. Sollte kein Unterschied im Fahrerverhalten gefunden werden, so ließe sich daraus schlussfolgern, dass der Wechsel zwischen den Fahrzeugtypen den Lernprozess nicht beeinflusst. Insbesondere im Hinblick auf den Mischbetrieb von Elektrofahrzeugen und Verbrennerfahrzeugen im Car-Sharing oder in Dienstwagenflotten wäre dies ein positives Ergebnis.



3.4 Kann ein EV-erfahrener Fahrer das Elektrofahrzeug bei Bedarf effizienter bewegen?

Letztendlich sollen auch Faktoren, die vom individuellen Charakter des Fahrers abhängen (vgl. Kapitel 2.3.1), in die Ergebnisfindung mit einbezogen werden. Dazu soll das von jedem einzelnen Fahrer unter der Anweisung möglichst effizient zu fahren erzielbare Einsparpotential evaluiert werden. Dies bietet außerdem die Möglichkeit, die zur Effizienzbewertung des Fahrerverhaltens verwendeten Metriken zu validieren. Die hierzu aufgestellte Hypothese lautet:

Hypothese 4:

Auf Anweisung können alle Probanden durch Anwendung effizienten Fahrerverhaltens den Verbrauch des Elektrofahrzeuges signifikant senken.

Die zur Überprüfung dieser Hypothese notwendigen Daten lassen sich nur unter identischen Rahmenbedingungen für alle Probanden gewinnen. Daher ist die Durchführung von Sonderversuchsfahrten auf einer Referenzstrecke unumgänglich. Die dort gewonnenen Ergebnisse lassen sich dann zwar nicht unmittelbar auf die im alltäglichen individuellen Betrieb gefahrenen Strecken übertragen, bieten aber die Möglichkeit die Fahrerpräferenzen mit in das Gesamtergebnis einzubeziehen.



4 Methodik

Zur Untersuchung von Veränderungen im Fahrerverhalten mit Elektrofahrzeugen wurde im Großraum München ein fünfmonatiger Realfahrzeugversuch mit MINI E *Conversion Electric Vehicles*³ durchgeführt. Um die gesamte Bandbreite der Forschungsfragen abzudecken, bestand dieser aus einem unreglementierten Langzeitfeldversuch und zusätzlichen Sonderversuchsfahrten auf einer definierten Referenzstrecke. Diese Kombination aus *Naturalistic Driving Study*⁴ im Langzeitfeldversuch und *Field Operational Tests*⁵ in den Sonderversuchsfahrten erlaubt es zum einen das tatsächliche Fahrerverhalten ohne Störung durch den Versuchsaufbau zu erforschen und bietet andererseits die Möglichkeit bestimmte Einflüsse auf das Fahrerverhalten durch gezielte Variation der Variablen zu ermitteln (FOT-Net, 2014).

Darüber hinaus wurde ein Experiment unter kontrollierten Bedingungen im Fahr Simulator des LfE durchgeführt, um die Eignung der Frequenzanalyse zur Fahrerverhaltensbestimmung zu evaluieren. In den folgenden Abschnitten werden der Aufbau und Ablauf des Feldversuches mit MINI E Elektrofahrzeugen, die Datenerfassung mittels einer Smartphone-Applikation, die Aufbereitung der Rohdaten, sowie das Vorgehen zur Datenauswertung in Anlehnung an die Metriken in Tabelle 2.2 beschrieben.

4.1 Versuchsfahrzeug MINI E

Als Versuchsfahrzeug wurde der MINI E von BMW gewählt (Abbildung 4-1). Mit seiner Antriebsleistung von 150 kW unterstützt er Fahrerverhalten bis in einen sehr dynamischen Bereich bei Längsbeschleunigungen von bis zu 4 m/s^2 . Der MINI E ist ein mit elektrischen Antriebskomponenten umgerüsteter MINI Cooper (*Conversion Electric Vehicle*) mit 35 kWh Batteriekapazität. Nach dem Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) wurde eine theoretisch idealisierte Maximalreichweite von 250 km pro Aufladezyklus ermittelt, die zu einer im realen Verkehr umsetzbaren Reichweite von 160 km führt. Das vollständige Aufladen dauert ohne Schnellladetechnik 9 Stunden. Durch den nachträglichen Einbau des Batteriepakets ist der



Abbildung 4-1: Versuchsfahrzeug MINI E (BMW Group, 2012)

³ Zum EV umgebautes konventionelles Fahrzeug

⁴ Nicht instruierter Fahrversuch im unreglementierten natürlichen Umfeld FOT-Net (2014)

⁵ Feldversuch unter Anwendung quasi-experimenteller Methoden FOT-Net (2014)



MINI E ein Zweisitzer mit kleinem Kofferraum. Die Fahrzeugmasse beträgt 1465 kg.

Die Rekuperationsfunktion ist derart in das Fahrpedal implementiert, dass bei dessen Loslassen die Stärke der Rekuperation kontinuierlich bis zur maximal möglichen Rekuperationsleistung des Gesamtsystems erhöht wird. Die dabei maximal mögliche Verzögerung durch Rekuperation beträgt $2,3 \text{ m/s}^2$. Wird eine höhere Verzögerung benötigt, so ist diese durch Betätigung des Bremspedals über die mechanischen Reibbremsen zu erzeugen.

Über das Powermeter (vgl. Abbildung 4-2) erhält der Fahrer Rückmeldung über den aktuellen Leistungsfluss im elektrischen Antriebsstrang und kann somit den Betriebszustand der E-Maschine im gesamten Spektrum von maximaler Rekuperation bis maximaler Leistungsabgabe erkennen. Insbesondere im Hinblick auf energieeffizientes Fahren mit gleichmäßiger Geschwindigkeit ist somit das Powermeter eine entscheidende Rückmeldefunktion. Über das Powermeter hinaus verfügt das Anzeigencluster des MINI E über eine Ladestandanzeige der Batterie, eine Anzeige der auf Basis des aktuellen Streckenverbrauchs ermittelten Restreichweite und eine Geschwindigkeitsanzeige. Assistenzsysteme sind im MINI E über die dem heutigen Stand der Technik entsprechenden Stabilitäts- und Traktionsregelsysteme hinausgehend keine weiteren verbaut.



Abbildung 4-2: Powermeter zur Anzeige der Leistungsabgabe der E-Maschine (horizontaler Strich links = Leerlauf; im Uhrzeigersinn = Leistungsabgabe; gegen den Uhrzeigersinn = Rekuperation; BMW Group, 2012)

4.2 Probandenkollektiv

Der Datensatz des Langzeitversuches besteht aus Fahrten von 35 Probanden. Das Durchschnittsalter beträgt 43,4 Jahre (SD 9,2 Jahre). 30 der 35 Probanden hatten ihren persönlichen MINI E für eine monatliche Rate bei der BMW Group geleast. Sie hatten also während der fünfmonatigen Nutzungsdauer jederzeit Zugriff auf das Fahrzeug. Die übrigen fünf Probanden waren Mitarbeiter eines Münchener Unternehmens, die den MINI E für private Fahrten nutzen konnten. Drei dieser Probanden teilten sich ein Fahrzeug. In diesen Fällen erfolgte die Zuordnung der Fahrtendaten zu den Probanden anhand der absolvierten Streckencharakteristiken von Start und Zielort unter Zuhilfenahme der Angaben in einem Fahrtenbuch. Um jahreszeitlich bedingte Witterungseinflüsse berücksichtigen zu können, wurde der Versuch in mehreren Kohorten durchgeführt. Die 15 Teilnehmer der ersten Kohorte fuhren von August 2012 bis Januar 2013, die 15 Teilnehmer der



zweiten Kohorte von März 2013 bis August 2013. Die Teilnehmer der dritten Kohorte hatten ihr Fahrzeug von September 2012 bis Juli 2013 zur Verfügung. Abbildung 4-3 veranschaulicht die Verteilung der Probanden auf die Fahrzeuge und die Kohorten.

| Kohorte I | | | | | | | | | | | | | | | Kohorte II | | | | | | | | | | Kohorte III | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|-----------|--------|
| VP 001 | VP 002 | VP 003 | VP 004 | VP 005 | VP 006 | VP 007 | VP 008 | VP 009 | VP 010 | VP 011 | VP 012 | VP 013 | VP 014 | VP 015 | VP 101 | VP 102 | VP 103 | VP 104 | VP 105 | VP 106 | VP 107 | VP 108 | VP 109 | VP 110 | VP 111 | VP 112 | VP 113 | VP 114 | VP 115 | VP 201 | VP 202 | VP 203 | VP 204 | VP 205 |
| MINI-E 1 | MINI-E 2 | MINI-E 3 | MINI-E 4 | MINI-E 5 | MINI-E 6 | MINI-E 7 | MINI-E 8 | MINI-E 9 | MINI-E 10 | MINI-E 11 | MINI-E 12 | MINI-E 13 | MINI-E 14 | MINI-E 15 | MINI-E 1 | MINI-E 2 | MINI-E 3 | MINI-E 4 | MINI-E 5 | MINI-E 6 | MINI-E 7 | MINI-E 8 | MINI-E 9 | MINI-E 10 | MINI-E 11 | MINI-E 12 | MINI-E 13 | MINI-E 14 | MINI-E 15 | MINI-E 16 | MINI-E 17 | | MINI-E 18 | |
| August 2012 – Januar 2013 | | | | | | | | | | | | | | | März 2013 – August 2013 | | | | | | | | | | September 2012 – Juli 2013 | | | | | | | | | |

Abbildung 4-3: Verteilung der Versuchsfahrzeuge auf die Probanden in den Kohorten

4.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf wurde an das von Krems, Franke, Neumann & Cocron (2010) entwickelte Vorgehen zur Befragung von Elektrofahrzeugnutzern angelehnt und um spezifische Elemente zur Erfassung von Veränderungen im Fahrerverhalten erweitert. Da das Versuchsdesign für die drei Kohorten identisch war, werden alle Probanden im Weiteren ohne Berücksichtigung des zeitlichen Versatzes als gleichbedeutend behandelt. Der Langzeitfeldversuch in Form einer *Naturalistic Driving Study* erlaubte es den Probanden, ihre individuellen Fahrten mit dem Elektrofahrzeug zu unternehmen, was im Probandendurchschnitt zu einem breiten Spektrum an Streckencharakteristiken führte. Diesem Effekt wurde zum einen methodisch durch streckenspezifische Auswertung der Langzeitfeldversuchsdaten begegnet, zum anderen wurden ergänzend Sonderversuchsfahrten in Form von *Field Operational Tests* auf einem definierten Rundkurs über öffentliche Straßen im Norden Münchens durchgeführt. Diese Sonderversuchsfahrten setzten sich aus Initialfahrt vor Beginn des Langzeitfeldversuches, Abschlussevaluation zum Abschluss des Langzeitfeldversuches und der Zwischenevaluation, die nach zweieinhalb Monaten MINI E Nutzungsdauer durchgeführt wurde, zusammen. Außerdem führten die Probanden der Kohorte II für mehrere Wochen ein Fahrtenprotokoll über alle Fahrten in anderen Fahrzeugen als ihrem Versuchsfahrzeug. Abbildung 4-4 zeigt einen Überblick über das Studiendesign.

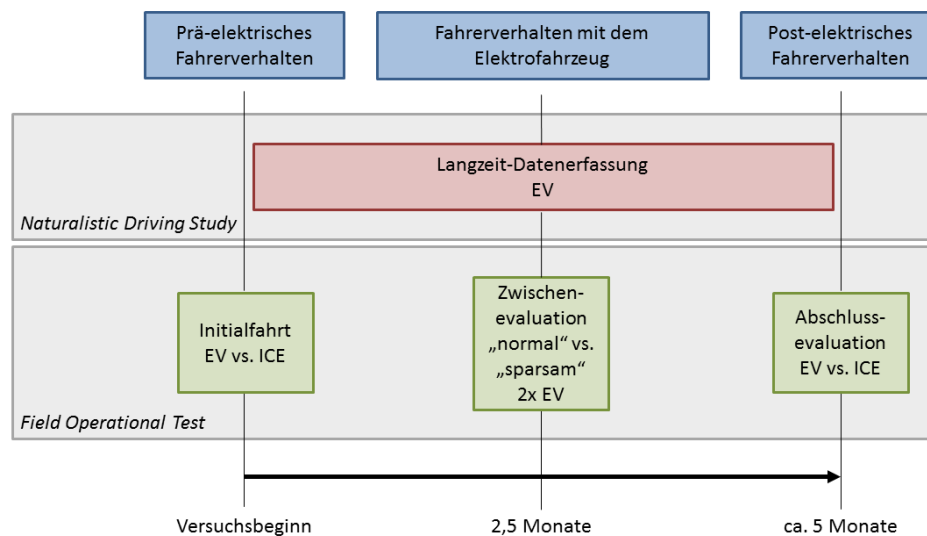


Abbildung 4-4: Überblick über das Studiendesign im Feldversuch

4.3.1 Langzeitfeldversuch

Basis zur Beantwortung der Forschungsfragen 3.1, 3.2 und 3.3 ist der fünfmonatige Langzeitfeldversuch, während dem die Probanden das elektrische Versuchsfahrzeug MINI E im persönlichen alltäglichen Gebrauch bewegten. Die Probanden erhielten, abgesehen von der technischen Einweisung in das Versuchsfahrzeug MINI E zu Beginn der Feldversuchsphase, keinerlei spezifische Anweisung zum Fahren mit dem Elektrofahrzeug. Dies stellte sicher, dass mögliche Lernvorgänge im Fahrerverhalten isoliert von erzwungenen Randbedingungen im Fahrtenverlauf oder der Motivation zur Fahrtenaufnahme untersucht werden können.

4.3.2 Zwischenevaluation

Ziel der Zwischenevaluation war die Bereitstellung eines geeigneten Datensatzes zur Beantwortung von Forschungsfrage 3.4. Dazu durchfuhren die Probanden die Referenzstrecke in permutierter Reihenfolge einmal mit der Anweisung den MINI E wie gewohnt zu fahren und einmal mit dem Ziel, so wenig Energie wie möglich zu verbrauchen. Um den Einfluss des Streckentyps auf das Fahrerverhalten auswerten zu können, wurde die Referenzstrecke so gewählt, dass ebenso innerstädtische Szenarien, wie auch Landstraße und Autobahn enthalten sind (vgl. Abbildung 4-5).

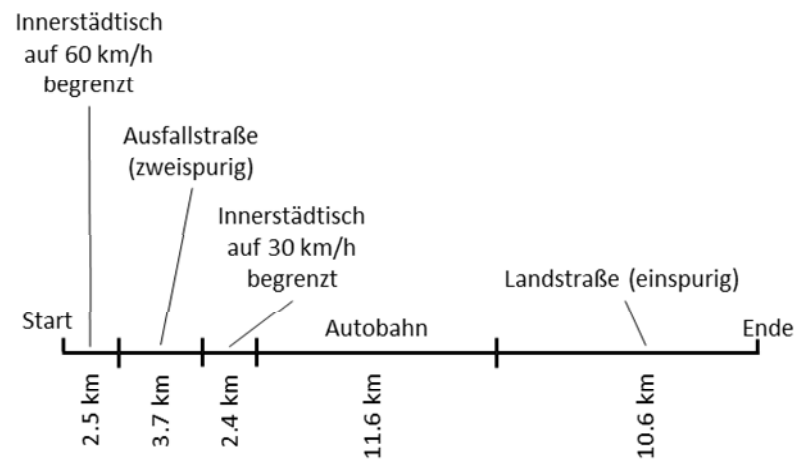


Abbildung 4-5: Schematische Aufteilung der Referenzstrecke in unterschiedliche Streckenbereiche

Um Einflüsse von Nebenverbrauchern zu eliminieren, wurde auf eine weitgehend konstante Einstellung von Klimaanlage, Belüftung, Licht und Radio geachtet. Klimaanlage und Radio waren abzuschalten, die Belüftung mit mittlerer Stärke zur Vermeidung von Beschlagen auf die Front- und Seitenscheibe gerichtet und das Licht eingeschaltet. Außerdem wurde jede Fahrt mit einem Ladezustand von 100% und betriebswarmer Batterie begonnen, um eine mögliche Leistungsdegradation aufgrund des Fahrzeugzustandes zu vermeiden.

4.3.3 Initialfahrt und Abschlussevaluation

Initialfahrt und Abschlussevaluation dienen der Identifikation abgeschlossener Lernvorgänge im Fahrerverhalten im EV und möglicher Auswirkungen auf das Fahren im ICE. Dazu wurde dieselbe Referenzstrecke wie in der Zwischenevaluation (vgl. Abschnitt 4.3.2) während Initialfahrt und Abschlussevaluation von den Probanden in permutierter Reihenfolge einmal mit dem MINI E und einmal mit dem eigenen ICE befahren. Der Vergleich des Fahrerverhaltens in Initialfahrt und Abschlussevaluation ist nicht Fokus dieser Arbeit, sodass hier lediglich zur ganzheitlichen Betrachtung an entsprechender Stelle der Zusammenhang mit den Ergebnissen des Langzeitfeldversuches hergestellt wird. Ausführliche Berichte zu den Ergebnissen von Initialfahrt und Abschlussevaluation bieten Helmbrecht, Olaverri-Monreal, Bengler & Vilimek, R., Keinath, A. (2014).

4.4 Datenerfassung

Um bereits während des laufenden Langzeitfeldversuches die Datenauswertung zu beginnen und vor dem Hintergrund, dass im Gesamtversuchssetting sowohl in ICE als auch EV Fahrdynamikdaten aufgezeichnet wurden, stellte eine Smartphone-Applikation mit Serveranbindung die optimale Lösung hinsichtlich Flexibilität, Kosten und Brauchbarkeit mit Einbußen bei der Genauigkeit und des Aufwandes zur Messdatenaufbereitung dar.



Die Applikation zur Aufzeichnung von Geschwindigkeitswerten auf Basis des GPS-Chips mit einer Aufzeichnungsrate von 1 Hz und Beschleunigungsmesswerten des Accelerometers mit einer Aufzeichnungsrate von 25 Hz wurde vom Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TUM für den Einsatz in Feldversuchen mit Elektrofahrzeugen entwickelt (Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München, 2015) und auf die besonderen Anforderungen des Langzeitfeldversuches abgestimmt. Die Applikation wurde auf Smartphones des Typs Apple iPhone 4 installiert, die in den Versuchsfahrzeugen verbaut wurden, wobei auf eine koaxiale Ausrichtung mit der Fahrzeuglängsachse geachtet wurde. Restpositionierungsfehler, die in Fahrzeugen der Kohorte I auftraten, in denen die Smartphones unzureichend gegen Verkippen gesichert waren, wurden nachträglich korrigiert. Um diesen Aufwand zu reduzieren, wurde für die Fahrzeuge der Kohorte II eine speziell angepasste Halterung gefertigt, die eine optimale Ausrichtung der Smartphone zum Fahrzeugkoordinatensystem sicherstellte (Abbildung 4-6).

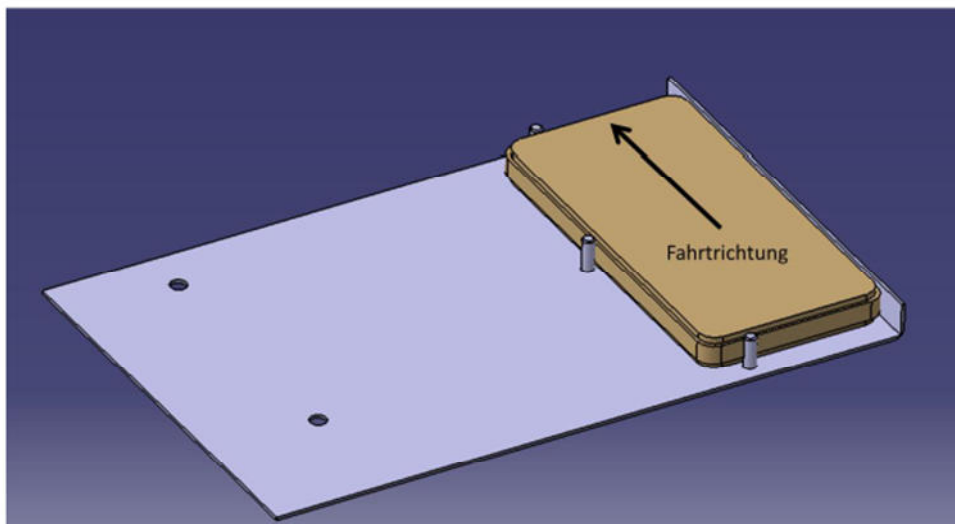


Abbildung 4-6: Halterung zur fahrtrichtungsparallelen Befestigung des Smartphones im Versuchsfahrzeug (Catia V5 – eigene Konstruktion)

Eine zusätzliche Ladeeinrichtung versorgte die Smartphones auch während längerer Standzeiten von bis zu 5 Tagen mit Strom. Die aufgezeichneten Datenpakete der mit synchronem Zeitstempel versehenen Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte wurden über das Mobilfunknetzwerk an einen zentralen Datenserver geschickt und dort in einer SQL-Datenbank gespeichert.

4.5 Filtern der Rohdaten

Geschwindigkeit und Position aus dem GPS-Sensor waren nicht weiter zu filtern, da zum einen die Aufzeichnungsfrequenz von 1 Hz kein Messrauschen im hohen Frequenzbereich erzeugte und zum anderen der im Endgerät integrierte Datenaufbereitungsalgorithmus die Rohdaten direkt zur weiteren Nutzung verwendbar machte.



Für die Beschleunigung war dagegen eine Vorbereitung der Messwerte zur anschließenden Weiterverarbeitung notwendig. Insbesondere zur Untersuchung der ersten zeitlichen Ableitung des Beschleunigungssignals war eine korrekte Glättung des Zeitverlaufs der Rohdaten unverzichtbar. Das vorhandene Messrauschen würde durch die Differentiation noch weiter verstärkt, wodurch die Ergebnisse über ein vertretbares Maß hinaus verfälscht worden wären. Einfache Filter wie der gern verwendete gleitende Mittelwert sind zwar sehr robust gegenüber Messrauschen, wegen der unerwünschten Glättung von Flanken im Signalverlauf allerdings ungeeignet um zeitliche Ableitungen zu untersuchen.

Zur Aufbereitung von Beschleunigungsdaten aus Feldversuchen werden in der Literatur zahlreiche Vorgehensweisen empfohlen, aus denen je nach Messtechnik und gewünschten Ergebnissen die am besten geeignete auszuwählen ist. Bratt & Ericsson (2000a) machten erfolgreich Gebrauch von der Methode des *Local Polynomial Modelling* nach Fan & Gijbels (1996), während Shan, Worrall & Nebot (2013) ein *Kalmanfilter* implementierten. Ebenso ist die Anwendung von *Butterworth* Filtertechniken prinzipiell geeignet.

Da einige dieser Methoden nur mit genauer Kenntnis der Modellparameter umzusetzen sind, standen nach einer Vorauswahl das *Local Polynomial Modelling* in der Variante des LOESS Filters und die Methode des *FFT Filters* mit Anwendung des *Hanning Windows* (Alessandrini et al., 2009) zur finalen Auswahl (vgl. Abbildung 4-7).

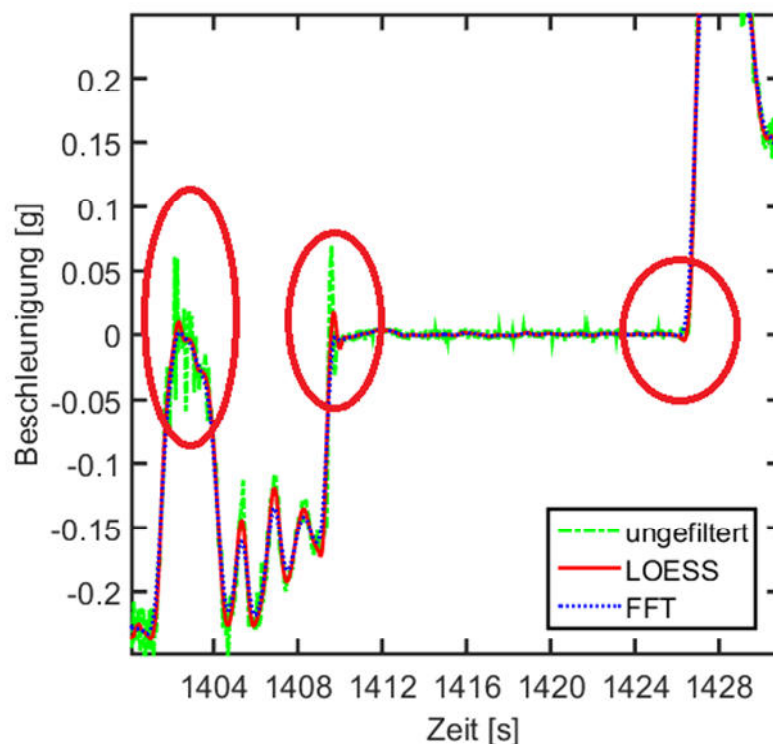


Abbildung 4-7: Filtern des Rohdatensignals der Längsbeschleunigung mit LOESS und FFT Filtermethoden



Die mit *FFT-Filter* erzeugten Zeitverläufe folgen ebenso wie die mit *LOESS Filter* erzeugten Zeitverläufe dem Rohdatensignal ausreichend genau. Dabei bietet das *FFT-Filter* gleichzeitig eine gute Glättung von hohen Frequenzen, die nicht aus der Fahrzeugbewegung sondern aus den Elastizitäten im Messaufbau und dem Messrauschen des Beschleunigungssensors stammen. Im Gegensatz zum *LOESS Filter* produziert das *FFT-Filter* allerdings keine Verfälschungen in Form von Überschwingern bei sehr schnellen Signaländerungen. Da sonstige auftretende Ausreißer von beiden Methoden gleichermaßen robust behandelt werden, fiel die Entscheidung letztlich zu Gunsten der *FFT* Filtermethode. Dieses Filter wurde direkt auf die Rohdaten der Zeitreihen der Längsbeschleunigung angewandt.

4.6 Vorbereitung des Datensatzes zur Auswertung

Die Zeittabellen wurden mit einer Serveranbindung unter MATLAB zur Auswertung vorbereitet und hinsichtlich der in Kapitel 4.7 definierten Metriken ausgewertet. Dazu wurden einerseits auf Basis des GPS Signals repräsentative Fahrten zur Berechnung der streckenbezogenen Metriken ermittelt und andererseits zur Bestimmung der manöverbezogenen Metriken im Beschleunigungsverlauf Bereiche mit Verzögerung bis Stillstand und anschließender Beschleunigung identifiziert.

Um die probandenindividuell repräsentative Fahrten betrachten zu können, wurden die Gesamtdatensätze aller 35 Probanden nach regelmäßig wiederholten Fahrten abgesehen, wobei jede mehrmals gefahrene Strecke nummeriert wurde. Fahrten, die durchschnittlich mehr als zweimal pro Monat absolviert wurden, sind getrennt nach Fahrtrichtung in das Set der repräsentativen Fahrten eines jeden Probanden aufgenommen und hinsichtlich des Streckentyps charakterisiert worden. Aufgrund des oft ungenauen GPS-Empfangs wurde diese Einteilung manuell vorgenommen.

Zur Identifikation von Abbrems- und Anfahrmanöver war das Geschwindigkeitssignal gerade im Stadtbereich aufgrund von Abschattung durch Gebäude, Brücken und Tunnel allein nicht immer ausreichend. Um Standphasen korrekt abzugrenzen, wurden deshalb im Gesamtdatensatz Zeitbereiche gesucht, während derer der Ruckverlauf konstant zwischen Werten von $0,005 \text{ m/s}^3$ und $0,005 \text{ m/s}^3$ lag, sich die Beschleunigung also nicht maßgeblich veränderte. Falls für diesen Zeitraum ein gültiges Geschwindigkeitssignal vorlag, musste dieses Null betragen. Standphasen von weniger als 5 s wurden dabei gesondert untersucht, da es sich hierbei auch um Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unkorrekter Geschwindigkeitswertangabe gehandelt haben könnte.

Um äußerst kurzfristige Unterbrechungen der Standphase, beispielsweise durch kurzes Anfahren und sofort darauf folgendes Abstoppen, und kleine Veränderungen im Längsruck, beispielsweise durch Bewegungen des Fahrers im Fahrzeug zu ignorieren, wurde die Standphase durch iteratives Absuchen des Beschleunigungsprofils in Richtung kleinerer und größerer Zeitwerte solange erweitert, bis maßgebliche Beschleunigungen ($< 1 \text{ m/s}^2$ und $> 1 \text{ m/s}^2$) auftraten und anschließend wieder soweit



zugeschnitten, bis die Beschleunigungen den während der Standphase vorherrschenden Beschleunigungswert erreichten. Dieser diente auch als Referenzwert für das jeweils vorhergehende bzw. darauffolgende Verzögerungs- bzw. Beschleunigungsmanöver, wodurch zudem die korrekte Detektion von Anhalten auf einer schiefen Ebene ermöglicht wurde. Abbildung 4-8 zeigt beispielhaft die identifizierten Bereiche eines Abbremsens bis Stillstand und des anschließenden Beschleunigens.

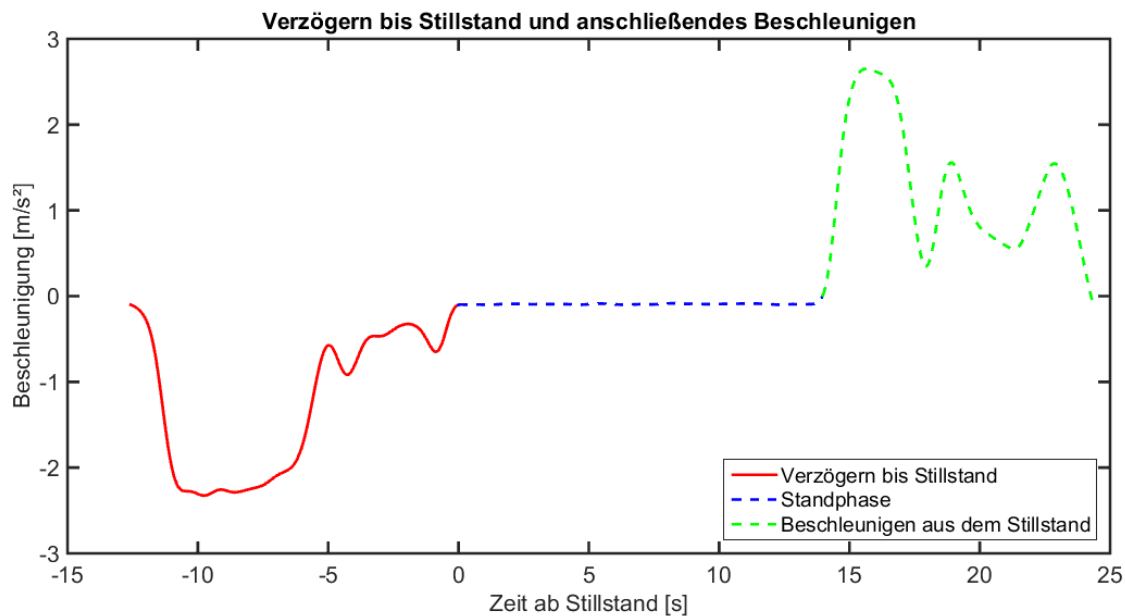


Abbildung 4-8: Identifizierte Zeitbereiche im Beschleunigungssignal für die Manöver Verzögern bis zum Stillstand und Beschleunigen aus dem Stillstand (beispielhaft für ein zufällig gewähltes Manöver eines Probanden)

4.7 Metriken zur Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens

Grundlage für die Auswertung des Feldversuchsdatensatzes hinsichtlich der Forschungsfragen ist die Bereitstellung der fahrstilcharakterisierenden Metriken. In Anlehnung an die in Kapitel 2.2.2 genannten im Wesentlichen auf Ericsson (2001) aufbauenden Messgrößen zur Bestimmung des Fahrerverhaltens wurden für das hier vorliegende Versuchssetting relevante und geeignete Metriken definiert. Wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben werden möglicherweise auftretenden Veränderungen im Fahrerverhalten zunächst auf Basis wiederholt befahrener Strecken betrachtet (Abschnitt 4.7.1). Dabei wurden individuell für jeden Probanden die repräsentativen Strecken isoliert untersucht und abschließend in ein Gesamtbild eingeordnet. Um zudem Veränderungen im Fahrerverhalten auf Basis vergleichbarer Manöver identifizieren zu können, wurden wiederkehrende Manöver wie das Verzögern bis zum Stillstand und das anschließende Beschleunigen gesondert betrachtet (Abschnitt 4.7.2).



4.7.1 Streckenbezogene Metriken

Ausgangspunkt für die Messung von Veränderungen im Fahrerverhalten ist die streckenbezogene Betrachtung der individuellen Datensätze. Um dabei eine probanden- und fahrtstreckenübergreifende Gesamtbetrachtung zu ermöglichen, wurde für jeden Probanden für jedes Set an repräsentativen Fahrten derselbe Satz an Metriken verwendet. Da allerdings nicht alle möglichen Variablen zur Beschreibung des Fahrerverhaltens (vgl. Kapitel 2.2.2) relevant für den hier betrachteten Anwendungsfall sind, wurde zunächst nach Vorbereitungen von Eckl (2015) eine Auswahl geeigneter Metriken anhand einer Vorauswertung eines Teildatensatzes durchgeführt. Dazu wurden die in Tabelle 4.1 gelisteten Größen auf die jeweils häufigsten Fahrten von 15 Probanden der Kohorte II angewandt und deren Verteilung für jeden Probanden verglichen. Je breiter die Werte dieser Variablen verteilt sind, desto eher eignen sie sich für eine differenzierte Betrachtung unterschiedlichen Fahrerverhaltens und somit zur zeitlichen Auflösung von Veränderungen im Fahrerverhalten.

Tabelle 4.1: Metriken zur Überprüfung der Eignung von Level-, Distribution- und Oscillation-Measures für die Erfassung von Veränderungen im Fahrerverhalten

| Metrik | Einheit | Einteilung nach Ericsson (2001) |
|---|--------------------------------|--|
| Mittlere Geschwindigkeit | m/s | <i>Level</i> |
| Mittlere Celeration | m/s ² | <i>Level</i> |
| 95. Perzentil der Geschwindigkeit | m/s | <i>Distribution</i> |
| 95. Perzentil positiver- und negativer Beschleunigung | m/s ² | <i>Distribution</i> |
| Variationskoeffizient | [] | <i>Distribution</i> |
| Mittelwert der quadratischen Beschleunigung | m ² /s ⁴ | <i>Oscillation</i> |

Die Vorauswertung hat gezeigt, dass die Geschwindigkeitsgrößen kaum über die einzelnen Fahrten des jeweiligen Probanden variieren. Sie sind somit nicht zur Identifikation von Veränderungen im Fahrerverhalten geeignet. Dagegen zeigten sowohl die *Level*-, als auch die *Distribution-Measures* der Beschleunigung ein gutes Auflösungsvermögen bezüglich der individuellen Variation im Fahrerverhalten. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 4-9 der Variationskoeffizient der Beschleunigung der mittleren Geschwindigkeit gegenübergestellt.

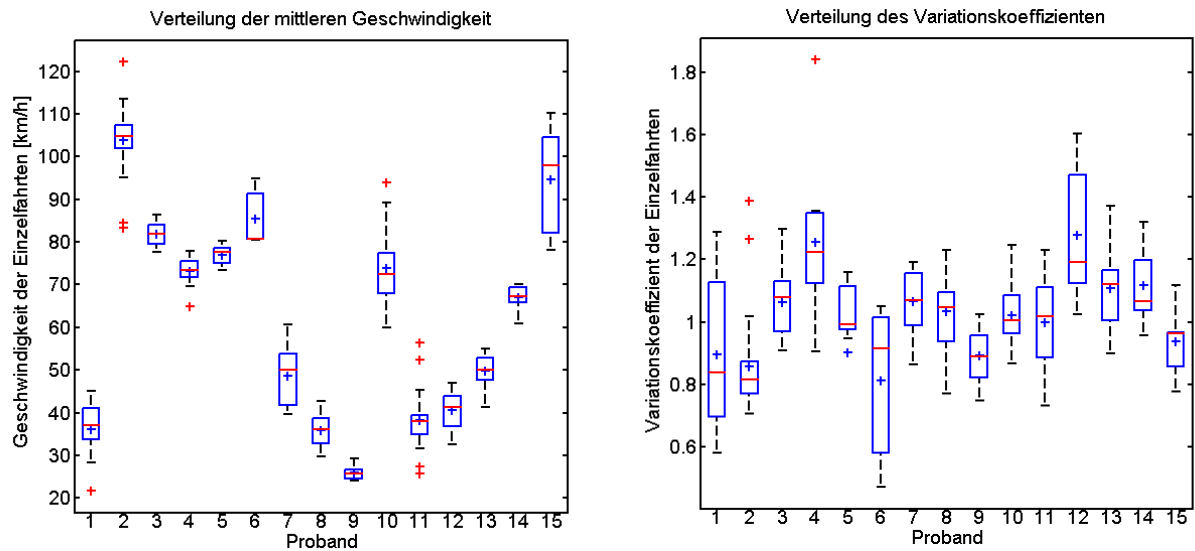


Abbildung 4-9: Verteilung von mittlerer Geschwindigkeit und Variationskoeffizienten der Beschleunigung über die einzelnen Probanden ($n = 15$; Kohorte II; alle Fahrten auf der jeweils häufigsten Strecke)

Der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Theorie über das energieeffiziente Fahren im Elektrofahrzeug folgend, wurden daher als Größen für die streckenbezogene Auswertung die in Tabelle 4.2 aufgeführten Größen gewählt. Die jeweilige Berechnung aus den Rohdaten ist im Anhang A spezifiziert.

Tabelle 4.2: Ausgewählte Metriken zur Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens im Elektrofahrzeug

| Metrik | Einheit | Art der Metrik |
|---|----------------|-----------------------|
| Anteil mechanischer Verzögerung | % | Distribution |
| Anteil regenerativer Verzögerung | % | Distribution |
| Konstantfahrtanteil | % | Distribution |
| Anteil der Beschleunigung | % | Distribution |
| Verteilung der Beschleunigung (Zeitanteil in 1 m/s^2 Klassen) | % | Distribution |
| Variationskoeffizient der Beschleunigung | [] | Distribution |
| 95. Perzentil der Beschleunigung in 4 Geschwindigkeitsklassen | m/s^2 | Distribution |
| 95. Perzentil der Verzögerung in 4 Geschwindigkeitsklassen | m/s^2 | Distribution |
| Mittlere Celeration | m/s^2 | Level |
| Standardabweichung der Beschleunigung | m/s^2 | Distribution |
| Mittlere Beschleunigung | m/s^2 | Level |
| Mittlere Verzögerung | m/s^2 | Level |
| Mittlere Geschwindigkeit | m/s | Level |
| Verteilung des Rucks (Zeitanteil in 1 m/s^3 Klassen) | % | Distribution |



Ein energieeffizientes, gleichmäßiges Fahren kann generell anhand eines hohen Konstantfahranteils ausgemacht werden. Um allerdings auch innerhalb der Zeitanteile von Verzögerung und Beschleunigung genauer auflösen zu können, wurde außerdem die Verteilung der Beschleunigungswerte in Klassen von 1 m/s^2 Breite berechnet (vgl. Anhang A). Ein hoher Anteil an schwacher Beschleunigung und schwacher Verzögerung lässt dabei unmittelbar auf einen energieeffizienten Fahrstil schließen. Ein optimaler Einsatz der Rekuperation liegt dann vor, wenn dadurch nicht zu stark verzögert wird, ein wesentlicher Anteil der Verzögerung also im Bereich von -1 bis -2 m/s^2 liegt. Da der negative Einfluss der starken Beschleunigung mit steigender Geschwindigkeit zunimmt, wurden die Werte des 95. Perzentsils in 4 Geschwindigkeitsklassen berechnet, die sich an den Geschwindigkeitsbeschränkung auf deutschen Straßen orientieren (vgl. Anhang A). Eine generelle Vermeidung von starkem Beschleunigen und Verzögern lässt sich mit niedrigen Werten für den Variationskoeffizienten nachweisen, der die Standardabweichung der Beschleunigung auf den Mittelwert aller Fahrten bezieht und somit weitestgehend unabhängig von streckenbedingten Einflüssen ist. Um ein ganzheitliches Bild zu erzeugen wurden zudem die *Level-Measures* der Beschleunigung in die Auswertung einbezogen.

4.7.2 Validierung der streckenbezogenen Metriken

Ebenso wie Redsell, Lucas & Ashford (1993) die Abhängigkeit des Verbrauchs von Fahrerhaltensgrößen für das Verbrennerfahrzeug untersucht haben, wurden hier für das EV die Werte in den Metriken der Fahrdynamik mit den gemessenen Verbrauchswerten korreliert. Da beide Variablen in metrischen Skalen vorliegen, wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson r_p verwendet (Field, 2013). Den Basisdatensatz für diese Validierung der Metriken bietet die Zwischenevaluation (vgl. 4.3.2), da dies der einzige Teilversuch ist, aus dem Messwerte zum Energieverbrauch vorliegen.

Die ausgewählten Metriken zur Bestimmung der Energieeffizienz des Fahrerhaltens korrelieren mit Ausnahme des 95. Perzentsils der Verzögerungen durchweg signifikant mit dem Energieverbrauch im Versuchsfahrzeug. Hervorzuheben sind insbesondere der Konstantfahranteil, der Variationskoeffizient, das 95. Perzentil der Beschleunigung im Geschwindigkeitsbereich über 110 km/h , die mittlere Celeration und die Standardabweichung der Beschleunigung, die mit Werten über $0,7$ jeweils eine hohe Korrelation mit dem Energieverbrauch haben (vgl. Tabelle 4.3).



Tabelle 4.3: Korrelation des gemessenen Energieverbrauchs mit den ausgewählten Metriken zur Bewertung der Effizienz des Fahrerverhaltens

| | Anteil mechanischer Verzögerung | Anteil regenerativer Verzögerung | Konstantfahrtanteil | Anteil der Beschleunigung | Variationskoeffizient der Beschleunigung | 95. P. der Beschleunigung i von 0 bis 40 km/h | 95. P. der Beschleunigung i von 40 bis 60 km/h | 95. P. der Beschleunigung i von 60 bis 110 km/h | 95. P. der Beschleunigung i über 110 km/h | 95. P. der Verzögerung i von 0 bis 40 km/h | 95. P. der Verzögerung i von 40 bis 60 km/h | 95. P. der Verzögerung i von 60 bis 110 km/h | 95. P. der Verzögerung i über 110 km/h | Mittlere Celeration | Standardabweichung der Beschleunigung |
|-------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------------|--|---|--|---|---|--|---|--|--|---------------------|---------------------------------------|
| r_p | 0,252 | 0,276 | -0,744 | 0,646 | 0,710 | 0,622 | 0,591 | 0,689 | 0,719 | -0,127 | 0,028 | -0,319 | 0,112 | 0,748 | 0,735 |
| Signifikanz | 0,022 | 0,012 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | 0,254 | 0,805 | 0,004 | 0,315 | <0,001 | <0,001 |

Das Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten ist zudem konform mit den Erwartungen aus der Theorie über das effiziente Fahren mit dem Elektrofahrzeug (vgl. Tabelle 2.3 aus Kapitel 2.2.3). Auf Grundlage der ausgewählten Metriken kann demnach unmittelbar auf den Energieverbrauch im Elektrofahrzeug geschlossen werden. Auch wenn die Perzentilwerte für die Verzögerung nicht mit dem Verbrauch korrelieren, so werden sie dennoch als wichtige Parameter zur Evaluation des Umgangs mit der im Fahrpedal integrierten Rekuperationsfunktion in allen weiteren Analysen beibehalten.

4.7.3 Manöverbezogene Metriken

Zusätzlich zu den streckenbezogenen Metriken werden situative Metriken auf Manöverbasis betrachtet. Unabhängig vom Typ der dabei gefahrenen Strecke können vergleichbare Manöver definiert und für das gesamte Probandenkollektiv ausgewertet werden. Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass manöverbasierter Fahrstrategien zum verbrauchsoptimierten Fahren isoliert von weiteren weniger kontrollierbaren Situationen betrachtet werden können. So ist beispielsweise der strategische Einsatz der Rekuperation unter optimaler Ausnutzung des Rekuperationspotentials vor allem bei Verzögerungen bis zum Stillstand zu erfassen. Als Metrikensatz für die manöverbezogene Auswertung wurden daher die in Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5 aufgelisteten Größen ausgewählt. Die Berechnung der Metriken aus den Rohdaten ist Anhang A zu entnehmen.



Tabelle 4.4: Ausgewählte Metriken zur Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens in Verzögerungsmanövern

| Metriken – Verzögern bis zum Stillstand | Einheit | Art der Metrik |
|--|----------------|-----------------------|
| Anteil mechanischer Verzögerung | % | Distribution |
| Anteil der Verzögerung von -2 m/s^2 bis -1 m/s^2 | % | Distribution |
| Maximum der Verzögerung | m/s^2 | Level |
| Median der Verzögerung | m/s^2 | Level |
| Standardabweichung der Verzögerung | m/s^2 | Distribution |
| Geschwindigkeit zu Rekuperationsbeginn | m/s | Level |
| Dauer der Rekuperationsphase | s | Level |

Tabelle 4.5: Ausgewählte Metriken zur Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens in Beschleunigungsmanövern

| Metriken – Beschleunigen aus dem Stillstand | Einheit | Art der Metrik |
|---|----------------|-----------------------|
| Anteil der Beschleunigung von 0 m/s^2 bis 1 m/s^2 | % | Distribution |
| Anteil der Beschleunigung von 1 m/s^2 bis 2 m/s^2 | % | Distribution |
| Maximum der Beschleunigung | m/s^2 | Level |
| Median der Beschleunigung | m/s^2 | Level |
| Standardabweichung Beschleunigung | m/s^2 | Level |

4.8 Vorgehen zur Analyse zeitlicher Veränderungen

Mögliche zeitliche Veränderungen im Fahrerverhalten wurden zunächst für den gesamten Probandendurchschnitt (Forschungsfrage 3.1) untersucht, wobei die Identifikation allgemein gültiger Lernkurven im Vordergrund stand. Um in einem zweiten Schritt die Einflüsse von Streckencharakteristiken und anderen probandenindividuellen Einflussgrößen zu evaluieren (Forschungsfrage 3.2), wurden die einzelnen Fahrten einzelner Probanden gezielt hinsichtlich einer möglichen Effizienzsteigerung durch optimiertes Fahrerverhalten näher betrachtet. So lassen sich positive und negative Entwicklungen des Fahrerverhaltens in Bezug zu Streckenlänge, Streckentyp und individueller Motivation stellen. Abbildung 4-10 gibt einen Überblick über das Vorgehen zur Bereitstellung der jeweiligen Bewertungsgrößen aus den Rohdaten unter Berücksichtigung der **Anforderungen 1 bis 3** aus Kapitel 2.

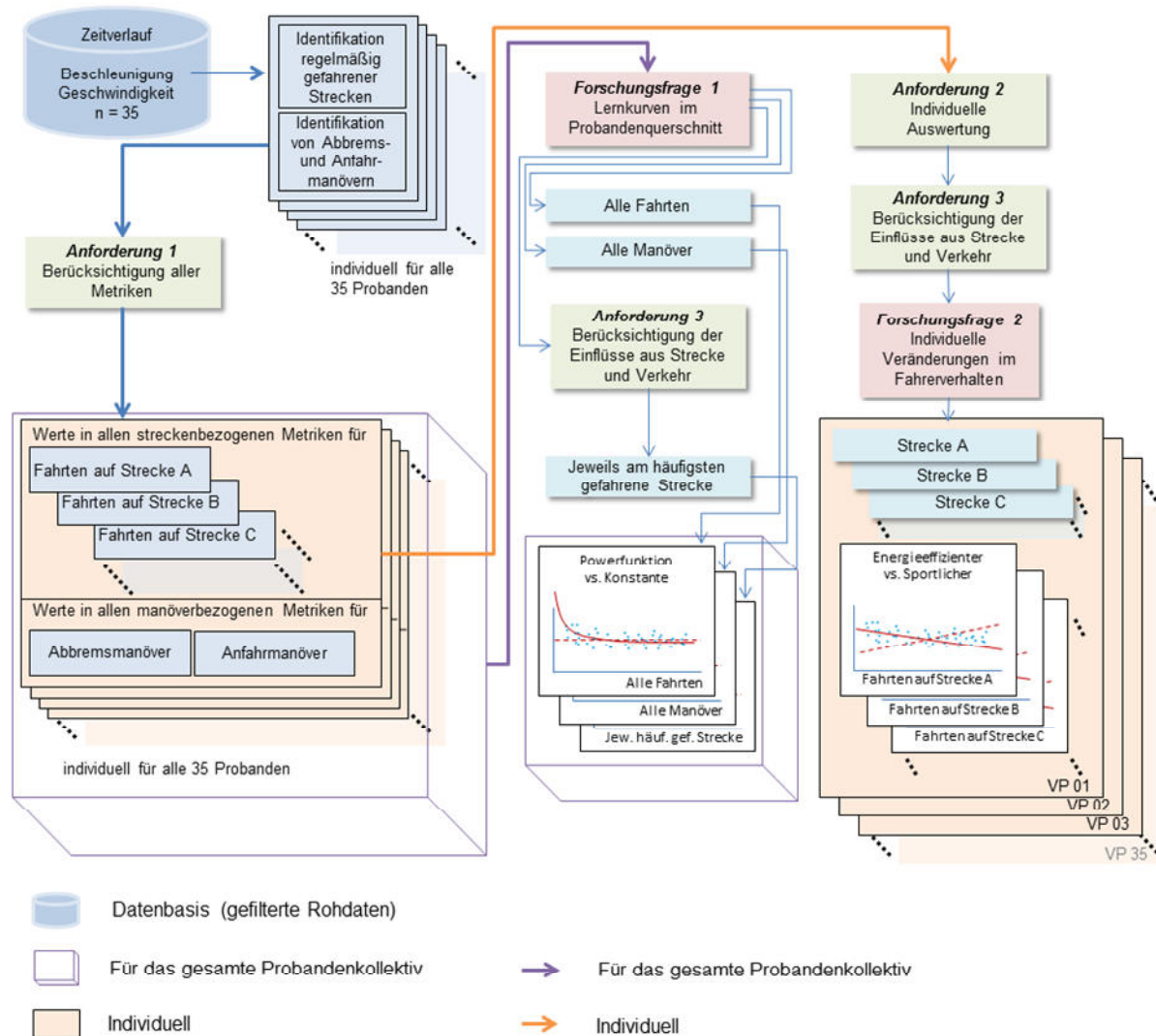


Abbildung 4-10: Vorgehen zur Identifikation der Veränderungen im Fahrverhalten (Forschungsfragen 3.1 und 3.2)

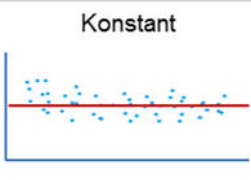
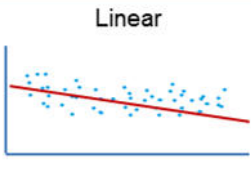
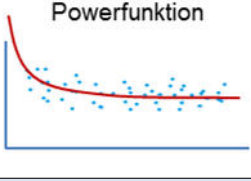
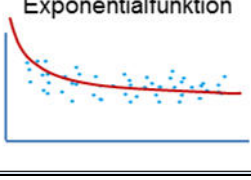
Ausgangspunkt ist dabei stets der Gesamtdatensatz an Beschleunigungs- und Geschwindigkeits-Zeitverläufen. Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, wurden regelmäßig gefahrene Strecken und repräsentative Manöver identifiziert, für die die jeweiligen Metrikensätze (vgl. Kapitel 4.7.1 und 4.7.3) berechnet wurden. Je nachdem ob im Weiteren alle Probanden gemeinsam (Forschungsfrage 3.1) oder einzeln (Forschungsfrage 3.2) betrachtet werden, sind die jeweiligen Metriken entweder im Probandenkollektiv oder auf individuellem Niveau als Basis für die Erzeugung der Näherungskurven zu verwenden. Im Falle der Gesamtbetrachtung aller Probanden führt dies zu einem Satz an Näherungskurven für das gesamte Probandenkollektiv. Die individuelle Auswertung stellt dagegen 35 unterschiedliche Sätze an Näherungskurven bereit. Mit diesen Näherungskurven lassen sich die zur Untersuchung der Forschungsfragen aufgestellten Hypothesen überprüfen.



4.8.1 Auswertung im Probandendurchschnitt

Für den Probandendurchschnitt wurden ebenso die streckenbezogenen wie auch die situationsbezogenen Metriken herangezogen. Als Wiederholungsbasis für die Streckenmetriken dienten dabei abgeschlossene Fahrten. Dazu wurden alle in Kapitel 4.7.1 definierten Metriken einmal für sämtliche Fahrten und in einem weiteren Schritt für die jeweils am häufigsten durchgeführten repräsentativen Fahrten eines jeden Probanden betrachtet. Die entsprechenden Werte wurden zuerst für jede Fahrt einzeln berechnet und dann auf Basis der kleinsten gemeinsamen Anzahl an Wiederholungen durchschnittlich über das Probandenkollektiv ausgewertet. Die situationsbezogenen Metriken aus Kapitel 4.7.3 dienten der streckenunabhängigen Untersuchung von Lernprozessen und der von anderen nicht identifizierbaren Situationen getrennten Einzelbetrachtung effizienzbestimmender Fahrmanöver. Auch sie wurden durchschnittlich über das Probandenkollektiv ausgewertet. Anschließend wurden für jede der streckenbezogenen und situationsbezogenen Metriken vier Näherungskurven mit den in Tabelle 4.6 dargestellten Parametern erzeugt.

Tabelle 4.6: Näherungskurven und die Bestimmung ihrer Parameter

| Näherungskurve | Gleichung | Bestimmung der Kurvenparameter | Verlauf |
|---------------------|--------------------------|--|---|
| Konstante | $y = k$ | k: Mittelwert aller Werte aller Probanden |  |
| Linearer Trend | $y = B \cdot x + b$ | B,b: aus dem Datensatz, Methode der kleinsten Fehlerquadrate |  |
| Powerfunktion | $y = B \cdot x^{-b} + c$ | B,b,c: aus dem Datensatz, Methode der kleinsten Fehlerquadrate |  |
| Exponentialfunktion | $y = B \cdot e^{-x} + c$ | B,c: aus dem Datensatz, Methode der kleinsten Fehlerquadrate c: Mittelwert des letzten Drittels der Werte aller Probanden |  |

Diese vier Näherungskurven dienen der Überprüfung theoretisch zu erwartender Veränderungsmuster in den entsprechenden Metriken. Die Powerfunktion ist die nach Newell & Rosenbloom (1981) verwendete Beschreibungskurve für Lernprozesse, die auf Wiederholungsbasis, wie hier des regelmäßig wiederholten Befahrens derselben Strecke mit dem zu Beginn ungewohnten Elektrofahr-



zeug, ablaufen. Da die generelle Anwendbarkeit der Powerfunktion jedoch nicht zweifelsfrei nachgewiesen ist (vgl. Brown, S., Heathcote, A., 2003) und bei der Beschaffenheit des hier vorliegenden Datensatzes möglicherweise an ihre Grenzen stößt, wurde zur Detektion ähnlich verlaufender Lernkurven die Exponentialfunktion herangezogen. Diese nähert sich ebenfalls an einen Grenzwert an und ist in der Literatur als Alternative zur Powerfunktion akzeptiert (vgl. Heathcote, Brown & Mewhort, 2000). Abschließend wurde anhand eines linearen Trends überprüft, inwiefern unabhängig von spezifischen Kurvenverläufen signifikante zeitliche Veränderungen im Fahrerverhalten stattfinden.

Als dimensionsloses Maß für die Güte der Trendkurven wurde jeweils der relative RMSE⁶ in Bezug auf den Mittelwert der jeweiligen Metrik berechnet. Daraus lässt sich beurteilen, welche der drei untersuchten Referenzkurven am Besten in den jeweiligen Satz aus Messwerten passt. Abschließend wurde als Referenz zudem der relative RMSE einer Konstanten auf dem Niveau des Mittelwerts der Fahrten mit dem der drei vorgeschlagenen Lernkurven verglichen. Weichen diese Werte nicht signifikant voneinander ab, so ist der vermutete Lernverlauf kein besseres Modell für die vorliegenden Daten als die Annahme eines über die Nutzungszeit des Elektrofahrzeuges unveränderten Fahrerverhaltens in dieser betrachteten Metrik.

Zur Bestätigung der Gültigkeit der **Hypothese 1** aus Forschungsfrage 3.1 müssen Metriken, die positiven Einfluss auf den Energieverbrauch haben, fallende Lernkurven aufweisen. Analoges gilt für Metriken, die negativen Einfluss auf den Energieverbrauch haben.

4.8.2 Individuelle Auswertung

Über die durchschnittliche Betrachtung hinaus, wurden zur Überprüfung von **Hypothese 2** aus Forschungsfrage 3.2 mögliche Veränderungen im Fahrerverhalten auf individuellem Niveau untersucht. Dazu wurden die Zeitverläufe individuell für jeden Probanden und dabei jeweils für die unterschiedlichen repräsentativen Fahrten dieses Probanden ausgewertet. Hat ein Proband mehrere Sets an repräsentativen Fahrten, so wurden die Metriken aus Kapitel 4.7.1 getrennt für jedes dieser Fahrtensets angewandt. Da die Erzeugung von Trendkurven höheren Grades auf eine Vielzahl an Datenpunkten angewiesen ist, wurde in der individuellen Betrachtung für jede Metrik und jede Strecke der lineare Trend (vgl. Tabelle 4.6) bestimmt und dessen Signifikanz ermittelt.

Eine Korrelation zwischen der Richtung eines signifikanten linearen Trends und der Länge der Strecke bzw. dem Streckentyp bestätigt die Gültigkeit dieser Hypothese. Die Streckentypen untergliedern sich nach Einteilung der Fahrten auf Basis des GPS-Signals in Stadt, Landstraße und Autobahn und greifen damit eine gängige Grob-Klassifikation nach Fastenmeier (1995a) auf.

⁶der Root Mean Square Error ist ein übliches Maß zur Bestimmung der Güte von Näherungskurven (vgl. Fan und Gijbels (1996))



Da die Bewertung der Energieeffizienz nur unter Berücksichtigung aller Metriken erfolgen kann (vgl. Kapitel 2.2), ist es nötig die Effizienz des Fahrerverhaltens auf Basis der Ergebnisse in den einzelnen Metriken zu klassifizieren und auf einer Skala abzubilden. Dies geschah anhand des in Tabelle 4.7 ausgeführten Schemas. Dabei stellte der Grad der Energieeffizienz, in deren Richtung die Veränderung des Fahrerverhaltens verläuft, die Grundlage für die Klassifizierung dar. Je nachdem wie stark diese Tendenz in den einzelnen Metriken ausgeprägt war, wurde das Fahrerverhalten auf der fünfstufigen Ordinalskala von effizienter bis sportlicher eingeordnet.

Zeigte ein Proband auf einer bestimmten Strecke beispielsweise nur in wenigen aber dafür effizienzentscheidenden Messgrößen wie etwa dem starken Beschleunigen und dem Anteil mechanischen Verzögerns einen fallenden Trend, so kann die Veränderung seines Fahrerverhaltens zwar nicht als genereller effizienter aber zumindest als tendenziell effizienter klassifiziert werden.

Tabelle 4.7: Klassifikation der Veränderungen im Fahrerverhalten zur Analyse der Korrelation mit individuellen Einflussgrößen

| | Veränderung des Fahrerverhaltens | | | | |
|---------------------------------------|---|-------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------|
| <i>Trend</i> | <i>Signifikant fallender Trend</i> | | <i>Kein Trend</i> | <i>Signifikant steigender Trend</i> | |
| <i>Bewertungsbasis</i> | in allen Metriken | vorwiegend | | vorwiegend | in allen Metriken |
| <i>Bewertung des Fahrerverhaltens</i> | effizienter | tendenziell effizienter | gleichbleibend | tendenziell sportlicher | sportlicher |

Um auch den Einfluss des Streckentyps in die Auswertung einbeziehen zu können, wurden die befahrenen Strecken wie in Tabelle 4.8 dargestellt klassifiziert und auf einer Skala abgebildet. Grundlage für die dreistufige Ordinalskala war dabei die Einschränkung der Nutzbarkeit des EVs durch die begrenzte Reichweite (vgl. Kapitel 2.1). Beispielsweise sind Fahrten im Stadtgebiet bezüglich Reichweitenstress und Nachlademöglichkeit deutlich weniger kritisch als Fahrten über Autobahnen, auf denen weder sehr langsames Fahren noch Anhalten als Notlösung zur Option stehen. Die Landstraßen liegen in ihrer Kritikalität zwischen Autobahn und Stadt. Verließ eine Strecke über unterschiedliche Streckentypen, so war jeweils die höchste Klassifizierung entscheidend für die Einordnung der Gesamtstrecke.



Tabelle 4.8: Klassifikation der Streckencharakteristik zur Evaluation des Einflusses individueller Rahmenbedingungen

| | Streckentyp | | | | | |
|--|-------------|------------|----------|----------------------|--------------------|--------------------------------|
| | Stadt | Landstraße | Autobahn | Stadt und Landstraße | Stadt und Autobahn | Stadt, Landstraße und Autobahn |
| Kritikalität der begrenzten Reichweite | gering | mittel | hoch | mittel | hoch | hoch |

4.9 Vorgehen zur Auswertung des Einflusses der zwischenzeitlichen Nutzung von Verbrennerfahrzeugen

Der Einfluss der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges wurde anhand eines 14-tägigen Ausschnitts ermittelt, in dem die Probanden ihre zusätzlich mit einem Verbrennerfahrzeug vorgenommenen Fahrten in einem Fahrtenbuch protokollierten. So kann einerseits der Grad der intermittierenden Nutzung durch die Häufigkeit und Fahrstrecke der Verbrenner-Fahrten bestimmt werden und andererseits gezielt das Fahrerverhalten im MINI E unmittelbar nach einer Fahrt im Verbrenner mit dem allgemein in diesem Zeitraum vorherrschenden Fahrerverhalten im MINI E verglichen werden.

Dieser Vergleich wurde anhand der unter Kapitel 4.7.1 definierten Metriken, wie in Abbildung 4-11 dargestellt, einmal für die jeweils letzte Fahrt im EV vor Nutzung des Verbrenners und einmal für die letzte Fahrt auf vergleichbarer Strecke durchgeführt.

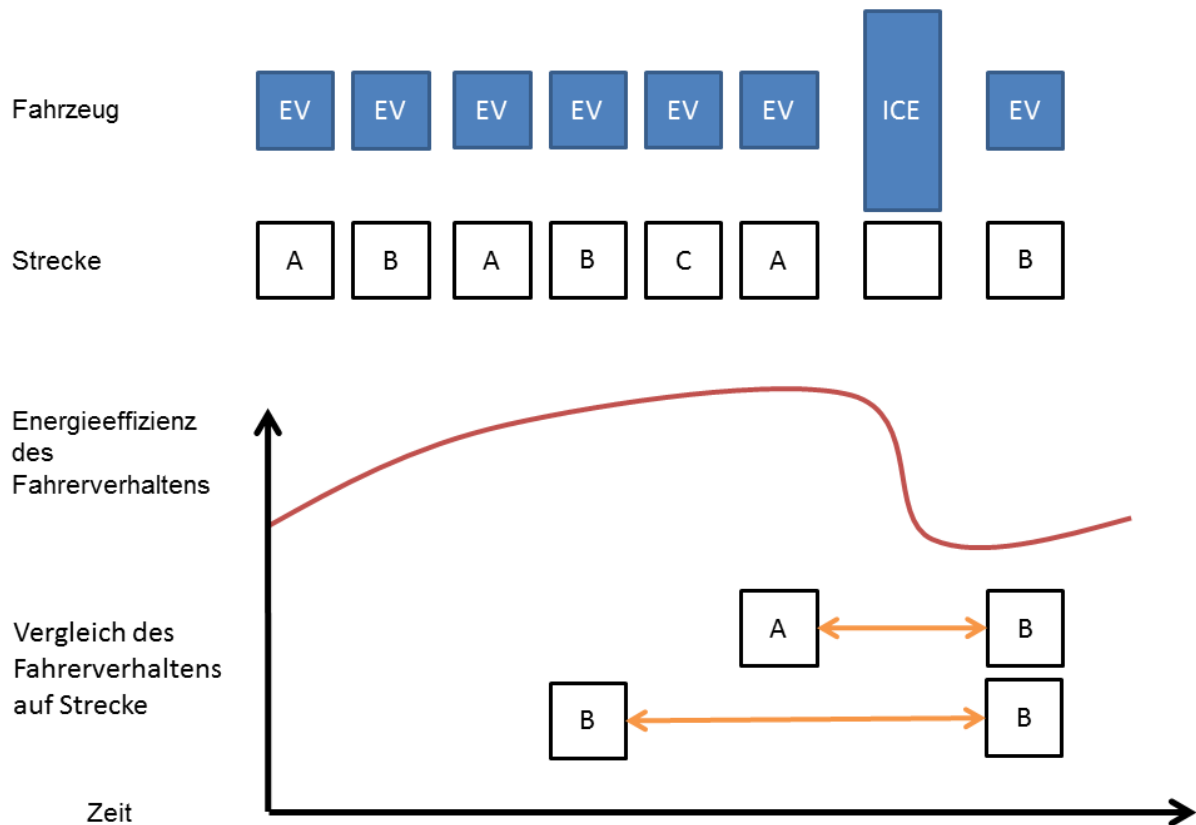


Abbildung 4-11: Vorgehen zur Identifikation des möglichen Einflusses der intermittierenden Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges auf die Energieeffizienz des Fahrerhaltens im EV (Forschungsfrage 3.3)

Die **Hypothese 3** aus Forschungsfrage 3.3 kann dann insofern überprüft werden, als dass zum einen Probanden mit einem höheren Anteil an intermittierenden Fahrten eine flachere Lernkurve haben müssten und zum anderen bei allen Probanden das Fahrerhalten auf den Fahrten, die unmittelbar nach der Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges mit dem MINI E vollführt wurden, weniger effizient ausfallen müsste.

4.10 Vorgehen zur Auswertung der Sonderversuchsfahrt zum Einsparpotential

Zur Überprüfung der **Hypothese 4** aus Forschungsfrage 3.4 dienen die Messdaten der zu diesem Zwecke durchgeführten Zwischenevaluationsfahrt (vgl. Kapitel 4.3.2), bei der die Probanden die Referenzstrecke einmal entsprechend ihrem normalen Fahrerhalten und ein weiteres Mal so sparsam wie ihnen möglich durchfahren haben. Um die durch optimiertes Fahrerhalten erreichbare Einsparung im Energieverbrauch zu erfassen, wurde die im Bordinstrument angezeigte Differenz im Batterieladestand nach jeder Fahrt abgelesen. Auf die Gesamtstreckenlänge bezogen, wurde daraus der Durchschnittsverbrauch in kWh/100 km berechnet.



Zusätzlich zum Verbrauchsunterschied zwischen sparsamer und normaler Fahrweise wurden grundlegende fahrdynamische Größen ausgewertet, die einen Rückschluss auf die verbrauchsbeeinflussenden Fahrerverhaltensgrößen ermöglichen. Die entsprechenden Metriken sind angelehnt an 4.7.1 in Tabelle 4.9 dargestellt.

Tabelle 4.9: Metriken zur Bewertung des Unterschiedes zwischen normaler und sparsamer Fahrweise

| Metrik | Einheit | Art der Metrik |
|---|------------------|-----------------------|
| Anteil mechanischer Verzögerung | % | <i>Distribution</i> |
| Anteil regenerativer Verzögerung | % | <i>Distribution</i> |
| Konstantfahrtanteil | % | <i>Distribution</i> |
| Anteil der Beschleunigung | % | <i>Distribution</i> |
| Variationskoeffizient der Beschleunigung | [] | <i>Distribution</i> |
| 95. Perzentil der Beschleunigung in 4 Geschwindigkeitsklassen | m/s ² | <i>Distribution</i> |
| 95. Perzentil der Verzögerung in 4 Geschwindigkeitsklassen | m/s ² | <i>Distribution</i> |
| Mittlere Celeration | m/s ² | <i>Level</i> |
| Standardabweichung der Beschleunigung | m/s ² | <i>Distribution</i> |

4.11 Verwendete statistische Methoden

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Forschungsfragen werden explorativ untersucht, weshalb es im Wesentlichen genügt auf deskriptive Statistiken zurückzugreifen. Dennoch bietet es sich für einige Anwendungsfälle an, statistische Tests zur Beurteilung der Ergebnisse heranzuziehen. Abbildung 4-12 gibt einen Überblick über die zur Beantwortung der einzelnen Forschungsfragen verwendeten statistischen Methoden, die im Folgenden genauer erläutert werden.

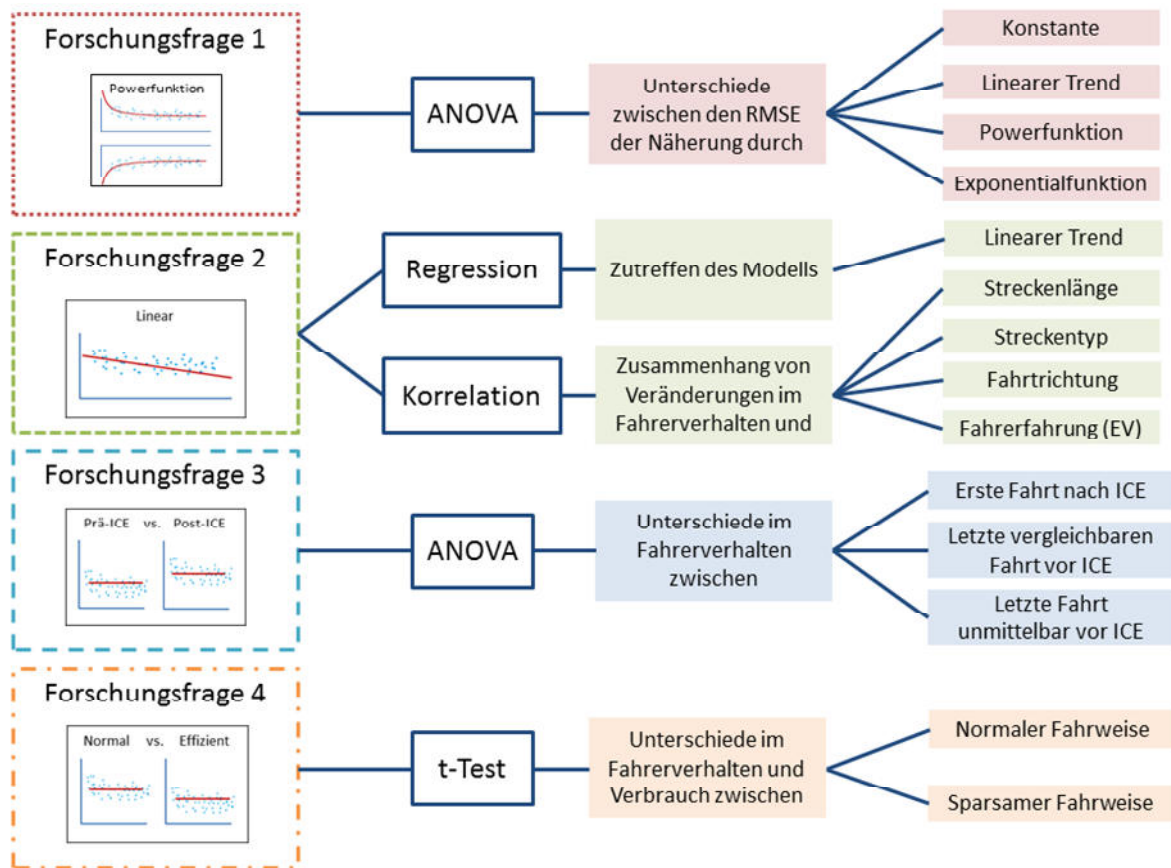


Abbildung 4-12: Überblick über die eingesetzten statistischen Methoden zur Beantwortung der Forschungsfragen

4.11.1 ANOVA

Die Varianzanalyse ANOVA fand Anwendung bei der Identifikation von Unterschieden in den RMSE der vier Näherungskurven zur Beschreibung der Veränderung des Fahrerhaltens im Elektrofahrzeug (Forschungsfrage 3.1) und bei der Bewertung von Unterschieden im Fahrerhalten vor und nach der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeugs (Forschungsfrage 3.3).

4.11.1.1 Überprüfung von Forschungsfrage 3.1

Zur Überprüfung von Unterschieden in der jeweiligen Abweichung der Näherungskurve von den Rohdaten (normalisierter RMSE) wurde die einfaktorische Varianzanalyse verwendet. Sollte die Annahme der Sphärizität nach Mauchly verletzt sein, wird mit den Korrekturfaktoren nach Greenhouse-Geisser weitergerechnet. Die Nullhypothese geht davon aus, dass die vier Näherungskurven keine unterschiedlichen RMSE aufweisen. Wird die Nullhypothese auf einem Signifikanzniveau von 5% abgelehnt, darf angenommen werden, dass die verschiedenen Funktionen unterschiedlich gute Näherungen für die zeitliche Veränderung im Fahrerhalten darstellen. Im anschließend paarweisen Vergleich (Post-Hoc Test; Korrekturfaktor: Bonferroni) wurden jeweils zwei Varianten gegenübergestellt (Field, 2013). So lässt sich gegebenenfalls der Verlauf der Power-Funktion als am besten passende



Näherungskurve bestimmen, was wiederum bedeutet, dass die Veränderungen im Fahrerverhalten mit ausreichender Wahrscheinlichkeit die Folge eines Lernprozesses auf Basis zunehmender Fahrerfahrung sind.

4.11.1.2 Überprüfung von Forschungsfrage 3.2

Auch zur Identifikation von Unterschieden im Fahrerverhalten vor und nach der zwischenzeitlichen Nutzung eines ICE wurde die ANOVA verwendet. Analog zum Fall in Abschnitt 4.11.1.1 wurde die Alternativhypothese überprüft, die davon ausgeht, dass die Unterbrechung durch Fahren im ICE das Fahrerverhalten im EV beeinflusst. Ein paarweiser Vergleich zwischen letzter Fahrt im Elektrofahrzeug unmittelbar vor Nutzung des EV, letzter Fahrt im EV auf vergleichbarer Strecke und erster Fahrt nach der Unterbrechung durch das ICE gibt Aufschluss über mögliche Rückschritte in der Gewöhnung an das Fahren im Elektrofahrzeug (vgl. Abbildung 4-11 in Kapitel 4.9).

4.11.2 Regression

Die Regressionsanalyse stellt fest, ob die Steigung des individuellen linearen Trends verschieden von Null ist (Field, 2013). So lässt sich nachweisen, dass der jeweilige Fahrer mit immer größerer Fahrerfahrung sein EV entweder energieeffizienter oder sportlicher bewegt.

4.11.3 Korrelation nach Spearman

Da die Variable Streckentyp nicht intervallskaliert ist und auch die Normalverteilung der probandenindividuellen Ergebnisse nicht nachgewiesen werden kann, ist für die Überprüfung des Einflusses individueller Rahmenbedingungen auf die Veränderungen im Fahrerverhalten die Korrelation nach Spearman anzuwenden (Field, 2013).

4.11.4 t-Test

Jeder Proband fuhr in der Zwischenevaluation dieselbe Versuchsstrecke zweimal. Demnach kann ein Unterschied in den Mittelwerten zwischen normalem und sparsamem Fahrerverhalten mittels *t*-Test für abhängige Stichproben nachgewiesen werden (Field, 2013). Die entsprechende Nullhypothese geht in diesem Fall davon aus, dass durch die gezielt sparsame Fahrweise weder eine Optimierung noch eine Verschlechterung des Fahrerverhaltens hinsichtlich der Energieeffizienz hervorgerufen wird. Kann diese Nullhypothese auf dem üblichen Signifikanzniveau von 5% abgelehnt werden, ist die Alternativhypothese anzunehmen, dass eine gezielt sparsame Fahrweise zu entsprechendem Fahrerverhalten führt.



4.12 Vorversuche in der Sitzkiste zur Frequenzanalyse

Über die in Kapitel 4.7 beschriebenen Metriken des Fahrerverhaltens hinaus bietet die Frequenzanalyse der Reglercharakteristik des Fahrers im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis (vgl. Kapitel 2.4.3) einen alternativen Ansatz zur Identifizierung möglicher Veränderungen im Fahrerverhalten. Da allerdings nicht ausgeschlossen werden konnte, dass die mit Smartphones (vgl. Kapitel 4.4) erfassten Fahrdynamikdaten in ihrer Auflösung und Genauigkeit unzureichend für die Bestimmung der Reglerparameter des Fahrers sind, wurde das Vorgehensprinzip zunächst anhand eines Simulatorversuchs unter möglichst kontrollierten Bedingungen evaluiert.

Durchgeführt wurde dieser Versuch im Rahmen der Masterarbeit Brettner (2015) an einem Einzelplatz-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie. Der Simulator besteht aus einem Profilorhrrahmen an dem der Monitor zur Darstellung der Frontsicht, sowie die primären Fahrzeugbedienelemente (Lenkrad, Gas und Bremspedal) und der Fahrersitz montiert sind. Über die Simulatorsoftware SILAB des WIVW⁷ und das damit verbundene Fahrdynamikmodell eines 74 kW starken VW Golf IV Automatik⁸ werden die Eingaben des Fahrers an den Stellteilen des Simulators in die Bewegung des Ego-Fahrzeugs in der Simulationsumgebung umgesetzt.

An dem Experiment nahmen 40 Probanden teil (Anteil weiblich: 53%, mittleres Alter 42 Jahre (SD = 16 Jahre)). Auf der simulierten Strecke durchfuhren die Probanden Autobahn, Landstraße und Stadtabschnitte. Die Probanden wurden nach einer Einweisung in den Aufbau des Simulators angewiesen, diese Versuchsfahrt entsprechend ihrer gewohnten Fahrweise zu absolvieren. Das Fahrerverhalten wurde nach Expertenurteil auf einer Skala von 1 (defensiv) bis 5 (sportlich) objektiviert.

Ziel war die Untersuchung der Abhängigkeit des Frequenzspektrums fahrdynamischer Metriken vom Fahrerverhalten unter Laborbedingungen. Ausgewertet wurden dazu unter anderem die Grenz-, Quartils- und Mittenfrequenzen der Längsbeschleunigung. Je stärker diese Metriken mit dem Fahrstil korrelieren, desto besser eignen sie sich zur Fahrerverhaltensmessung. In den Experimenten im Einzelplatz-Fahrsimulator konnte jedoch kein genereller Zusammenhang von Frequenzspektren und Fahrstil nachgewiesen werden. Weder auf der Autobahn, noch auf der Landstraße oder während der Stadtfahrt zeigten sich signifikante Abhängigkeiten der Grenz-, Quartils- und Mittenfrequenz von dem jeweiligen Fahrstil.

Allein im Folgefahrtszenario war ein Zusammenhang von Quartils- und Mittenfrequenz und Fahrstil erkennbar. Dieser Sonderfall ist allerdings für einen Feldversuch ohne Umfelderkennung zu außergewöhnlich, um die Frequenzanalyse als geeignete Metrik zu verwenden. Darüber hinaus konnte

⁷ Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (www.wivw.de)

⁸ Das Fahrdynamikmodell stammt von Müller Systemtechnik und wird zusammen mit SILAB angeboten.



nicht sichergestellt werden, dass die messtechnische Erfassung der Beschleunigungswerte mittels Smartphones ausreichend genaue Rohdaten bietet, um eine Frequenzanalyse korrekt durchführen zu können. In diesem Zusammenhang haben bereits Brettner, Fleischmann & Off (2013) gezeigt, dass selbst eine aufwändige Rohdatenaufbereitung nicht zwingend ausreichend ist.

Da die im Langezeitfeldversuch aufgezeichneten Fahrdynamikdaten den Anforderungen nicht genügen, wurden die Frequenzanalyse und die daraus resultierenden Metriken in der vorliegenden Dissertation nicht weiter berücksichtigt.



5 Ergebnisse

Zunächst wird aufbauend auf den im Probandendurchschnitt nachweisbaren Lernkurven die **Hypothese 1** aus Forschungsfrage 3.1 überprüft. Die weitergehende Untersuchung des Zusammenhangs der zeitlichen Veränderungen im Fahrerverhalten mit den individuellen Fahrtencharakteristiken in Abschnitt 5.3 dient der Bewertung der **Hypothese 2** aus Forschungsfrage 3.2. Der Einfluss der intermittierenden Nutzung eines Verbrennerfahrzeugs auf die Lernprozesse (**Hypothese 3** aus Forschungsfrage 3.3) und das fahrerverhaltensbedingte Einsparpotential (**Hypothese 4** aus Forschungsfrage 3.4) werden in den Abschnitten 5.4 und 5.5 dargestellt.

5.1 Überblick Datensatz

Insgesamt liegen im Datensatz der 35 Probanden 6149 einzelne Fahrten mit dem Elektrofahrzeug vor. Dabei haben alle Probanden zusammengenommen 77.682 km im MINI E zurückgelegt. Damit beträgt die durchschnittlich im MINI E gefahrene Strecke 2219 km. Der Proband mit den wenigsten Fahrten hat 16 Fahrten mit dem MINI E absolviert. Von 31 der 35 Probanden liegen mehr als 70 Fahrten im MINI E vor. 8 Probanden haben mehr als 240 Fahrten in den Datensatz eingebracht. Dabei sind 95% aller Fahrten weniger als 41 km lang und somit auch ohne Auflademöglichkeit am Umkehrpunkt gut mit dem begrenzten Energiespeicher des Versuchsfahrzeuges zu bewältigen. Die längste Fahrt wurde mit 204 km gemessen und liegt damit über der angegebenen Reichweite des MINI E. Abbildung 5-1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Streckenlängen im Gesamtdatensatz.

Zum Vergleich mit den Werten in den folgenden Kapiteln zeigt Tabelle 5.1 die deskriptiven Statistiken der wichtigsten Metriken im Durchschnitt über alle Fahrten im Datensatz des Feldversuchs. Ein vollständiger Überblick über alle Metriken ist dem Anhang B zu entnehmen.

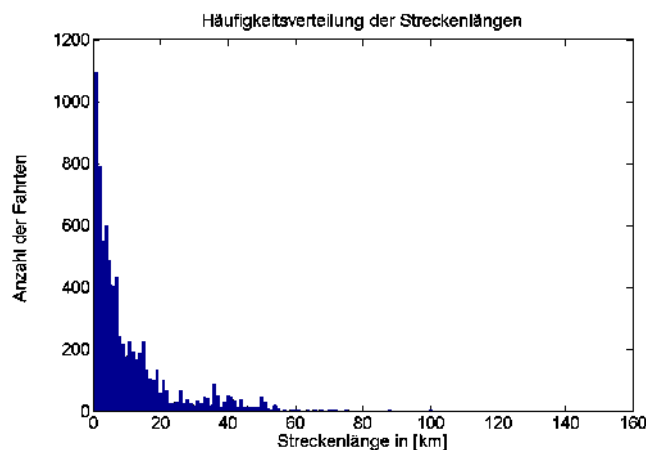


Abbildung 5-1: Häufigkeitsverteilung der Streckenlängen im Feldversuch ($n = 35$)



Tabelle 5.1: Deskriptive Statistik der wichtigsten Metriken ($n = 35$; alle Fahrten)

| <i>Metrik</i> | <i>Mittelwert</i> | <i>Standard- abweichung</i> | <i>25. Perzentil</i> | <i>Median</i> | <i>75. Perzentil</i> |
|--|-------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|
| Konstantfahrtanteil [%] | 63,52 | 12,67 | 57,92 | 64,78 | 71,33 |
| Variationskoeffizient [] | 1,24 | 0,28 | 1,09 | 1,23 | 1,39 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung über 110 km/h [m/s ²] | 0,88 | 0,41 | 0,63 | 0,91 | 1,18 |
| Mittlere positive Beschleunigung [m/s ²] | 1,03 | 0,21 | 0,92 | 1,02 | 1,14 |
| Mittlere Verzögerung [m/s ²] | -0,23 | 0,10 | -0,29 | -0,22 | -0,16 |
| Mittlere Celeration [m/s ²] | 0,45 | 0,14 | 0,37 | 0,44 | 0,53 |
| Standardabweichung der Beschleunigung [m/s ²] | 0,69 | 0,18 | 0,59 | 0,69 | 0,79 |

Damit liegen die in diesem Feldversuch gemessenen Werte des Fahrerverhaltens in ähnlichen Bereichen wie die aus anderen Feldversuchen mit Elektro- und Verbrennerfahrzeugen bekannten Werte (André, 1997; Bratt & Ericsson, 2000a). Allerdings fällt auf, dass mit dem EV durchschnittlich stärker beschleunigt wird, als es typischerweise mit dem ICE der Fall ist, bei dem die mittlere positive Beschleunigung bei nur 0,51 m/s² und die Standardabweichung der Beschleunigung bei 0,47 m/s² liegen (Bratt & Ericsson, 2000a).

5.2 Durchschnittliche Lernprozesse im Fahrerverhalten

Da die Energieeffizienz des Fahrstils nicht allein anhand einer einzigen Messgröße bestimmt werden kann, wird auch zur Überprüfung der **Hypothese 1** zunächst jede Metrik des Gesamtsatzes an Messgrößen einzeln untersucht. Dabei wird entsprechend der Aufteilung in streckengezogene und manöverbezogene Metriken vorgegangen. Aufbauend auf den Teilergebnissen in den einzelnen Metriken lässt sich dann die Frage nach dem generellen Erlernen eines effizienten Fahrstils mit dem Elektrofahrzeug anhand allgemein gültiger Lernkurven beantworten.

5.2.1 Zeitliche Veränderungen in streckenbezogenen Metriken

Der Probandendurchschnitt wird zunächst auf allen absolvierten Fahrten betrachtet. Um eventuelle Einflüsse der Fahrtstrecken zu eliminieren, wird in einem weiteren Schritt das Fahrerverhalten auf den jeweils am häufigsten gefahrenen Routen untersucht. Abschnitt 5.2.1.3 bietet eine Übersicht über die Teilergebnisse.



5.2.1.1 Alle Fahrten

Der Proband mit den wenigsten Fahrten hat 16 auswertbare Fahrten absolviert. Somit werden auch von allen weiteren Probanden nur die ersten 16 Fahrten in die Auswertung der Lernkurven einbezogen. Für keine der Metriken kann eine signifikant bessere Näherung durch das Powerlaw als durch die Konstante nachgewiesen werden (Ergebnis der Varianzanalyse im Anhang D), wobei die Werte der normalisierten RMSE für alle Näherungskurven in derselben Größenordnung liegen, wie die in Cocron (2014). Allerdings zeigen sich im 95. Perzentil der Beschleunigung im Geschwindigkeitsbereich über 110 km/h und im Anteil leichter Verzögerung im Bereich von -2 bis -1 m/s² tendenziell kleinere Werte der normalisierten RMSE der Power-Funktion als für den konstanten Verlauf (vgl. Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Normalisierter RMSE der Näherungskurven für das 95. Perzentil der Beschleunigung über 110 km/h und den Anteil leichter Verzögerung von -1 bis -2 m/s² (n = 35, alle Fahrten)

| Näherungskurve | Normalisierter RMSE | |
|----------------|--|--|
| | 95. Perzentil der Beschleunigung über 110 km/h [m/s ²] | Anteil leichter Verzögerung von -1 bis -2 m/s ² [%] |
| Konstant | 0,3375 | 0,4803 |
| Linear | 0,3392 | 0,4793 |
| Powerlaw | 0,3348 | 0,4778 |
| Exponentiell | 0,3350 | 0,4869 |

Dies lässt, wie in Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 zu sehen, auf eine relativ gute Beschreibung der Rohdaten durch das Powerlaw of Practice schließen. Im Falle des Anteils der leichten Verzögerung ist dieser Zusammenhang am deutlichsten zu erkennen.

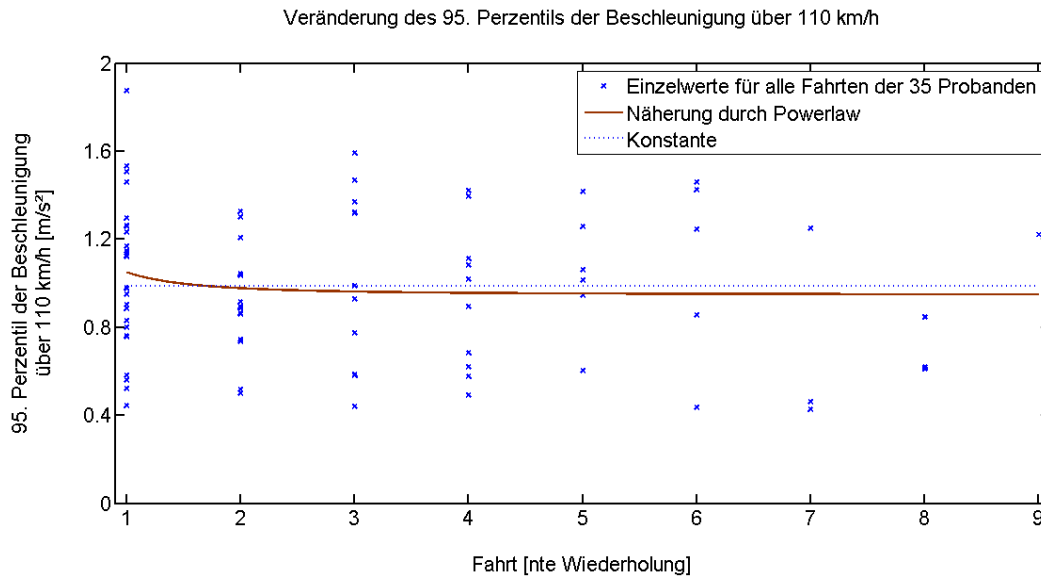


Abbildung 5-2: 95. Perzentil der Beschleunigung über 110 km/h [Berechnung nach Anhang A] für alle Probanden über der Wiederholung aller jeweils 16 ersten Fahrten mit Darstellung der relevanten Näherungskurven ($n = 35$; alle Fahrten)

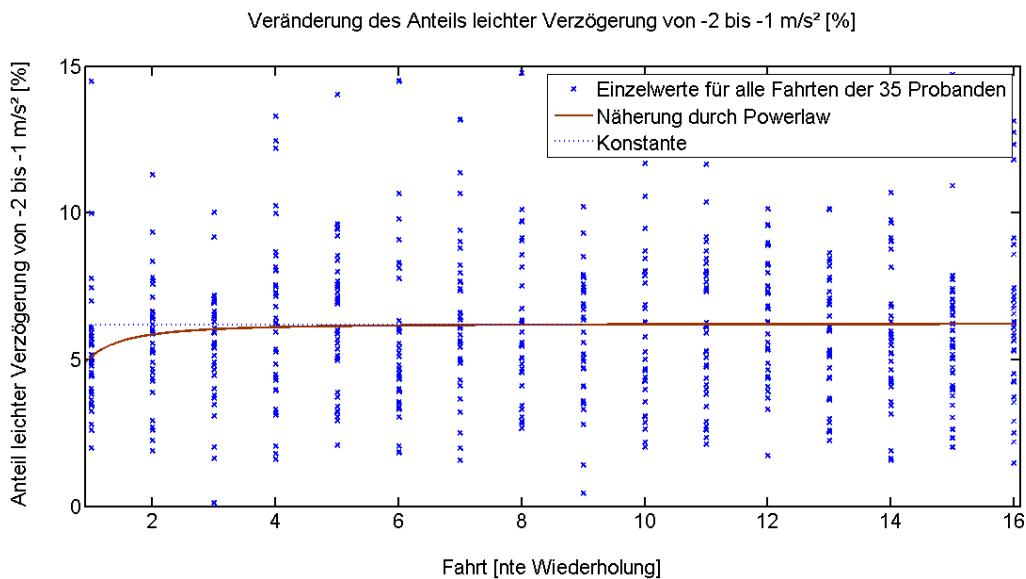


Abbildung 5-3: Anteil leichter Verzögerung von -2 bis -1 m/s² [Berechnung nach Anhang A] für alle Probanden über der Wiederholung aller jeweils 16 ersten Fahrten mit Darstellung der relevanten Näherungskurven ($n = 35$; alle Fahrten)

Gerade das starke Beschleunigen im hohen Geschwindigkeitsbereich wirkt sich äußerst ungünstig auf den Energieverbrauch und somit die Reichweite aus (Adornato et al., 2009). Auch ist es deutlich effizienter, weniger stark zu verzögern und somit einerseits Verluste durch Einsatz der mechanischen Reibbremse zu vermeiden und außerdem keine kinetische Energie zu verschwenden, die bei anschließendem Beschleunigen wieder über die gesamte Wirkungsgradkette mit Verlusten erkaufte werden müsste.



Bezüglich dieser zwei Metriken lässt sich somit ansatzweise ein Lernvorgang zu effizienterem Fahrerverhalten über das gesamte Probandenkollektiv und unabhängig von den gefahrenen Strecken nachweisen. In sämtlichen anderen Metriken unterscheiden sich die relativen RMSE von einer Konstante auf dem Niveau des zeitlichen Mittelwerts und der Näherung durch das Powerlaw nur unwesentlich bis gar nicht. Gut erkennbar ist dies auch in den in Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 dargestellten Näherungskurven für den Variationskoeffizienten und die Standardabweichung der Beschleunigung.

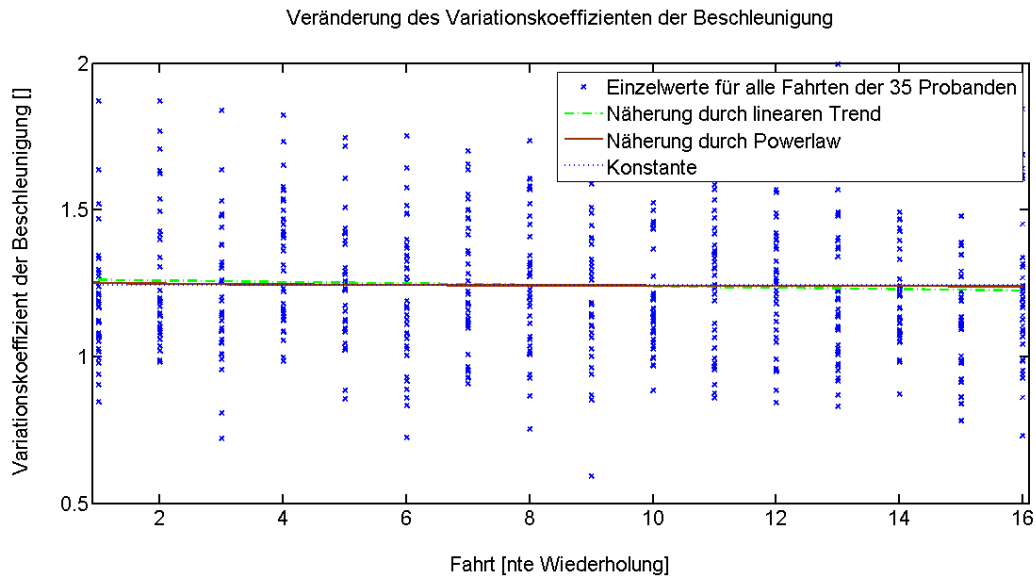


Abbildung 5-4: Variationskoeffizient der Beschleunigung [Berechnung nach Anhang A] für alle Probanden über der Wiederholung aller jeweils 16 ersten Fahrten mit Darstellung der relevanten Näherungskurven ($n = 35$; alle Fahrten)

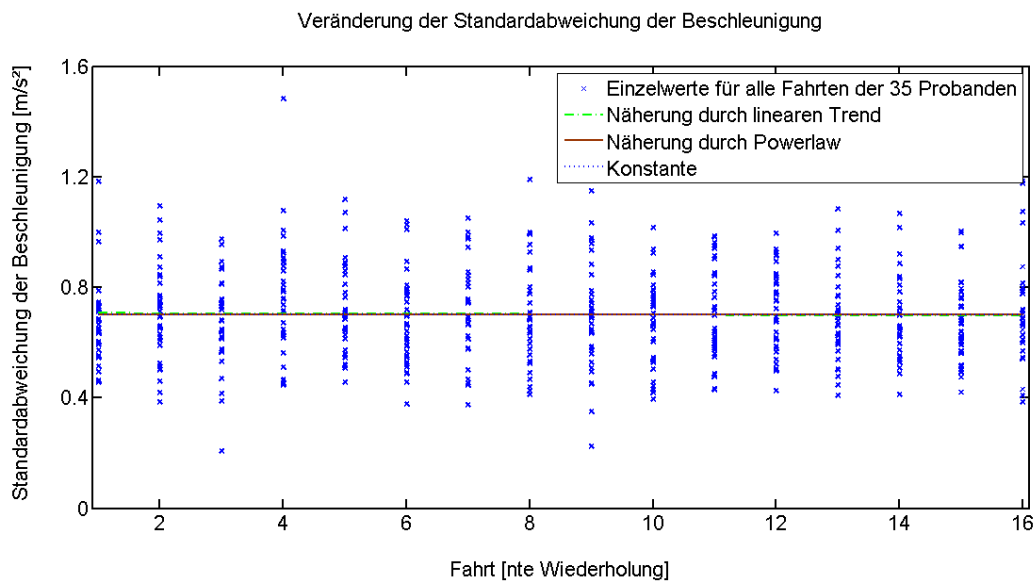


Abbildung 5-5: Standardabweichung der Beschleunigung [Berechnung nach Anhang A] für alle Probanden über der Wiederholung aller jeweils 16 ersten Fahrten mit Darstellung der relevanten Näherungskurven ($n = 35$; alle Fahrten)



Tabelle 5.3 zeigt die Werte der normalisierten RMSE für die vier Näherungskurven ausgewählter Metriken. Die vollständige Auflistung für alle Metriken kann dem Anhang C entnommen werden.

Tabelle 5.3: Normalisierter RMSE der Näherungskurven für den Konstantfahrtanteil, den Variationskoeffizienten, die mittlere Celeration und die Standardabweichung der Beschleunigung (n = 35, alle Fahrten)

| Näherungskurve | Normalisierter RMSE | | | |
|----------------|-------------------------|--------------------------|---|---|
| | Konstantfahrtanteil [%] | Variationskoeffizient [] | Mittlere Celeration [m/s ²] | Standardabw. der Beschleunigung [m/s ²] |
| Konstant | 0,1620 | 0,2109 | 0,2959 | 0,2515 |
| Linear | 0,1621 | 0,2111 | 0,2964 | 0,2519 |
| Powerlaw | 0,1615 | 0,2109 | 0,2954 | 0,2515 |
| Exponentiell | 0,1658 | 0,2127 | 0,2977 | 0,2517 |

Da die Bewertung der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens nur durch eine Gesamtbetrachtung aller Variablen erfolgen kann, darf allein aufgrund der tendenziell positiven Ergebnisse für das 95. Perzentil der Geschwindigkeiten und den Anteil leichten Verzögerns nicht auf einen generellen Lernprozess mit dem Ziel des möglichst effizienten Fahrens geschlossen werden. Festzuhalten bleibt aber, dass über das gesamte Probandenkollektiv und unabhängig von der Art der gefahrenen Strecke ein Erlernen der insbesondere für das Elektrofahrzeug verbrauchsmindernden Strategien des gezielten Ausnutzens der Rekuperationsfunktion erkennbar ist.

5.2.1.2 Jeweils am häufigsten gefahrene Strecken

Um nun auch die unterschiedlichen Strecken zu berücksichtigen, werden in einem weiteren Schritt die Durchschnittswerte für die jeweils am häufigsten gefahrenen Strecken analysiert. Da einer der 35 Probanden nur Fahrten auf unterschiedlichen Strecken hat, werden in diese Auswertung nur 34 der 35 Probanden einbezogen. Die größte gemeinsame Wiederholungsanzahl an regelmäßig gefahrenen Strecken beträgt für diese Probanden acht.

Bei alleiniger Betrachtung der regelmäßig absolvierten Fahrtrouten zeigen sich ähnliche Ergebnisse wie in Abschnitt 5.2.1.1. Für das 95. Perzentil der Beschleunigungen über 110 km/h bietet das Powerlaw bereits für die acht Wiederholungen auf den regelmäßig absolvierten Fahrten eine erkennbar bessere Näherung als die anderen Kurvenverläufe (vgl. Abbildung 5-6). Für den Zeitanteil der leichten Verzögerung lassen sich die Ergebnisse aus der streckenunabhängigen Betrachtung nicht bestätigen, was aber auch an der geringen Wiederholungszahl liegen mag. Zusätzlich zum 95. Perzentil



der Beschleunigung zeigt sich auch für das 95. Perzentil der Verzögerung über 110 km/h eine verhältnismäßig gute Näherung durch das Powerlaw (vgl. Abbildung 5-7).

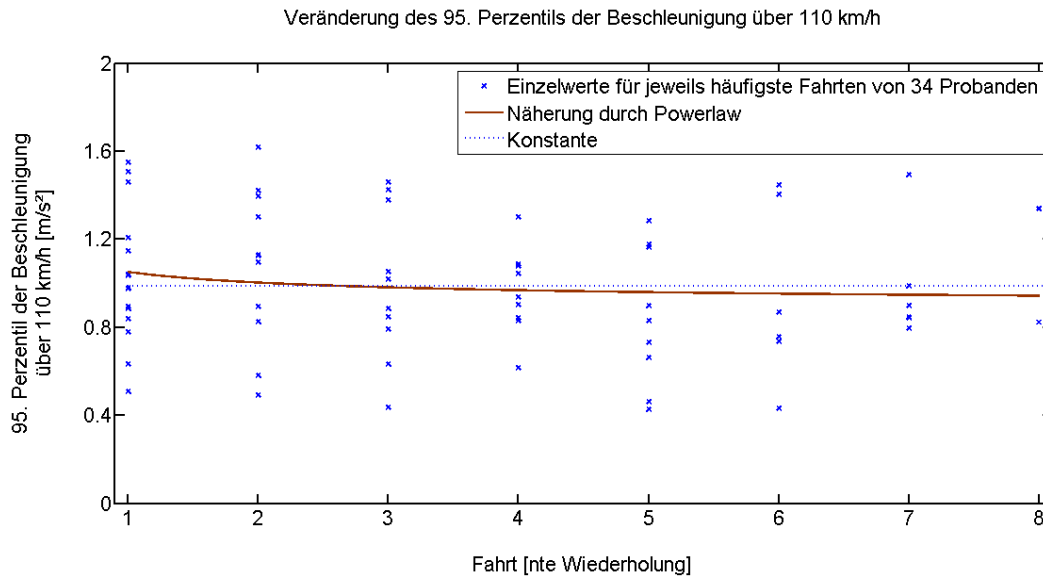


Abbildung 5-6: 95. Perzentil der Beschleunigung über 110 km/h [Berechnung nach Anhang A] für 34 Probanden über der Wiederholung ihrer jeweils acht ersten Fahrten auf der am häufigsten befahrenen Strecke mit Darstellung der relevanten Näherungskurven ($n = 34$; häufigste Fahrten)

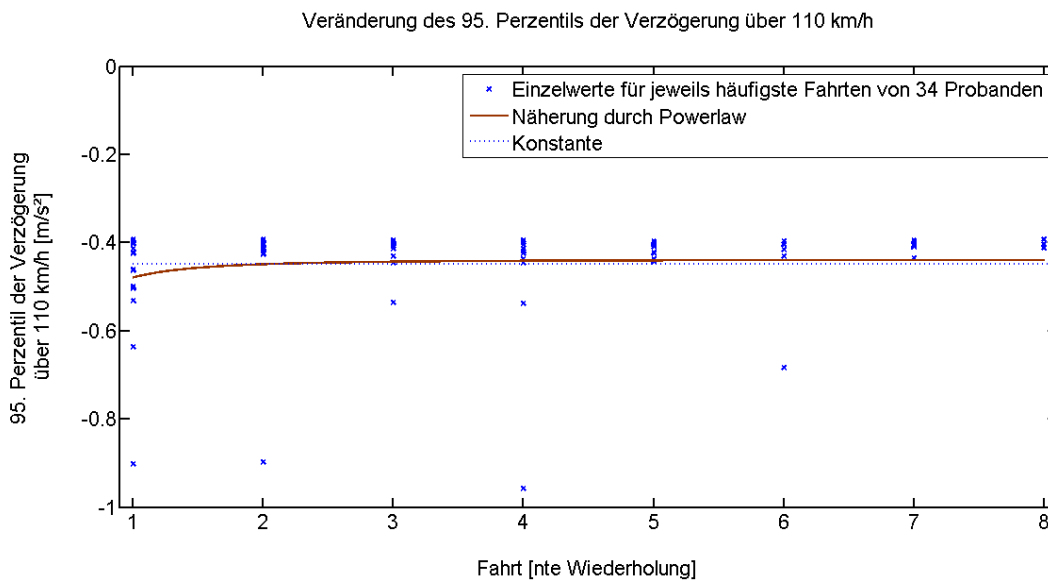


Abbildung 5-7: 95. Perzentil der Verzögerung über 110 km/h [Berechnung nach Anhang A] für 34 Probanden über der Wiederholung ihrer jeweils acht ersten Fahrten auf der am häufigsten befahrenen Strecke mit Darstellung der relevanten Näherungskurven ($n = 34$; häufigste Fahrten)

Die zugehörigen Werte des normalisierten RMSE für die Näherungskurven finden sich in Tabelle 5.4.



Tabelle 5.4: Normalisierter RMSE der Näherungskurven für das 95. Perzentil der Beschleunigung und das 95. Perzentil der Verzögerung über 110 km/h ($n=34$; häufigste Fahrten)

| Näherungskurve | Normalisierter RMSE | |
|----------------|--|---|
| | 95. Perzentil der Beschleunigung über 110 km/h [m/s^2] | 95. Perzentil der Verzögerung über 110 km/h [m/s^2] |
| Konstant | 0,3148 | 0,2494 |
| Linear | 0,3179 | 0,2498 |
| Powerlaw | 0,3125 | 0,2466 |
| Exponentiell | 0,3130 | 0,2634 |

Festzuhalten bleibt aber auch bei der streckenbezogenen Betrachtung, dass in allen anderen Metriken das Powerlaw keine wesentlich bessere Näherung für den Datensatz bietet als die Konstante mit dem Mittelwert aller Fahrten. Selbst wenn zum besseren Vergleich nur die Daten der 25 Probanden herangezogen werden, die mindestens 16 Fahrten auf ihrer am meisten gefahrenen repräsentativen Strecke absolviert haben, lässt sich weder für den Konstantfahrtanteil, noch für den Variationskoeffizienten, die mittlere Celeration oder die Standardabweichung der Beschleunigung ein erkennbarer Lernvorgang mit zunehmender Fahrerfahrung nachweisen. (vgl. Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5: Normalisierter RMSE der Näherungskurven für den Konstantfahrtanteil, den Variationskoeffizienten, die mittlere Celeration und die Standardabweichung der Beschleunigung ($n = 25$; häufigste Fahrten)

| Näherungskurve | Normalisierter RMSE | | | |
|----------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|---|
| | Konstantfahrtanteil [%] | Variationskoeffizient [] | Mittlere Celeration [m/s^2] | Standardabw. der Beschleunigung [m/s^2] |
| Konstant | 0,1234 | 0,1981 | 0,2344 | 0,1429 |
| Linear | 0,1233 | 0,1983 | 0,2343 | 0,1431 |
| Powerlaw | 0,1229 | 0,1977 | 0,2337 | 0,1427 |
| Exponentiell | 0,1229 | 0,1978 | 0,2337 | 0,1433 |

Beispielhaft sind die Verläufe der Näherungskurven für den Variationskoeffizienten der Beschleunigung in Abbildung 5-8 und die Standardabweichung der Beschleunigung in Abbildung 5-9 dargestellt.

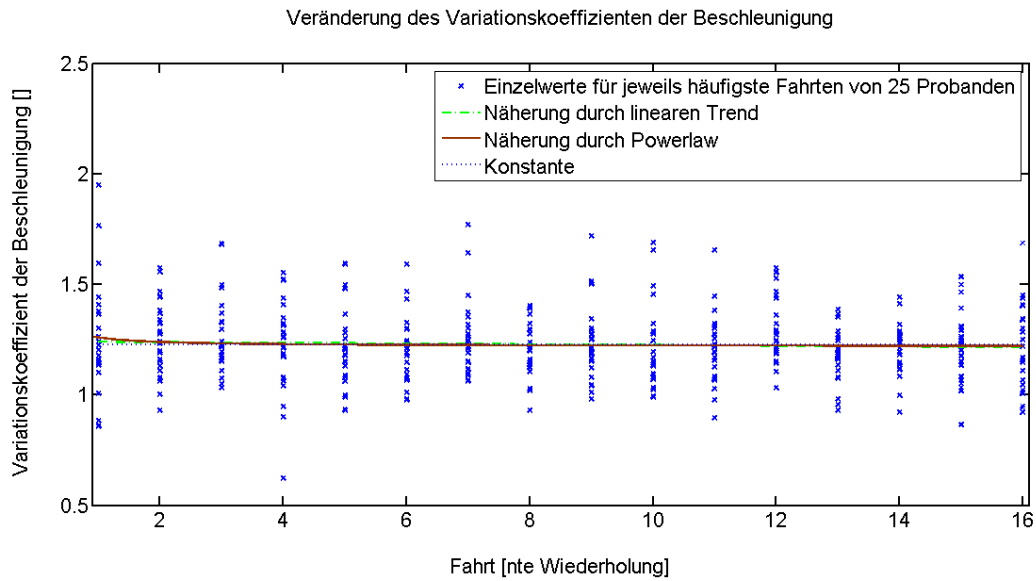


Abbildung 5-8: Variationskoeffizient der Beschleunigung [Berechnung nach Anhang A] für die 25 Probanden mit mehr als 16 Fahrten auf der häufigsten Strecke über der Wiederholung dieser Fahrten mit Darstellung der relevanten Näherungskurven ($n=25$; häufigste Fahrten)

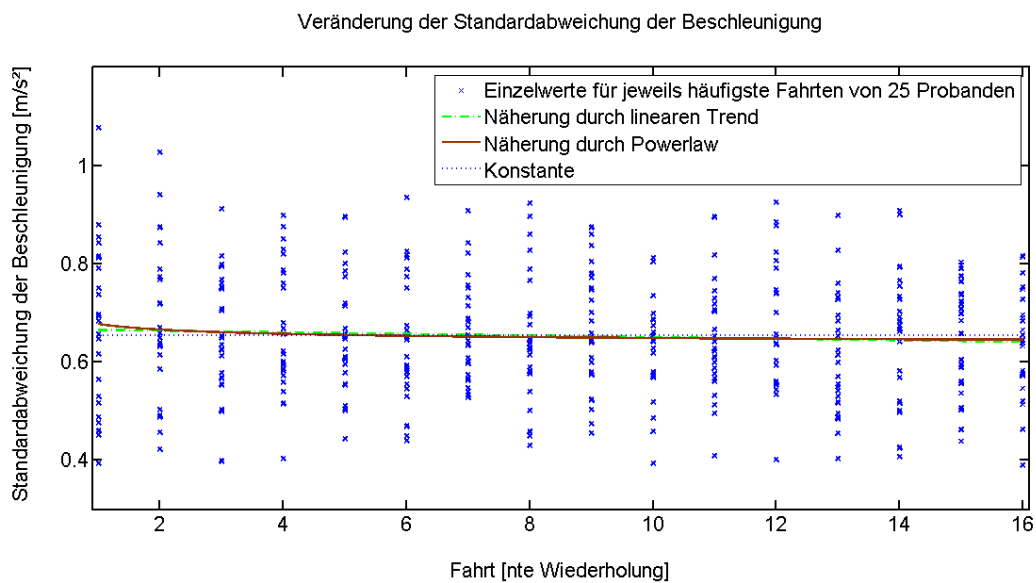


Abbildung 5-9: Standardabweichung der Beschleunigung [Berechnung nach Anhang A] für die 25 Probanden mit mehr als 16 Fahrten auf der häufigsten Strecke über der Wiederholung dieser Fahrten mit Darstellung der relevanten Näherungskurven ($n=25$; häufigste Fahrten)

Bei der gesonderten Betrachtung der Probanden mit mehr als 16 Fahrten auf vergleichbaren Strecken zeigt sich allerdings besonders deutlich das Erlernen des gezielten Einsatzes der Rekuperation. Sowohl für den Anteil der stärkeren Verzögerung im Bereich von -3 bis -2 m/s^2 (vgl. Abbildung 5-10) als auch für das 95. Perzentil der Verzögerung im gesamten Geschwindigkeitsbereich über 60 km/h (vgl. Abbildung 5-11) bietet das Powerlaw eine relativ gute Näherung.

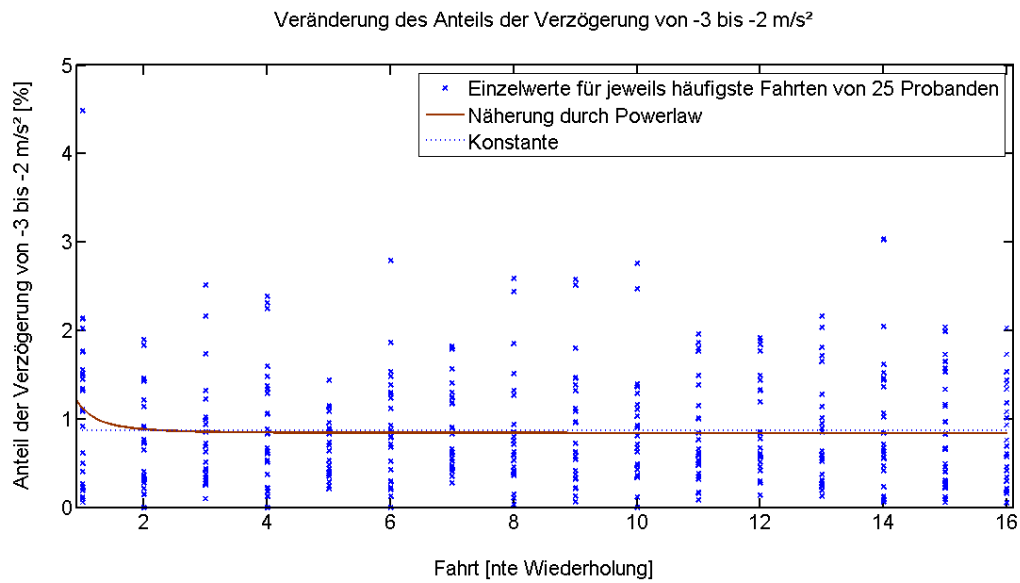


Abbildung 5-10: Anteil der Verzögerung von -3 bis -2 m/s² [Berechnung nach Anhang A] für die 25 Probanden mit mehr als 16 Fahrten auf der häufigsten Strecke über der Wiederholung dieser Fahrten mit Darstellung der relevanten Näherungskurven (n=25; häufigste Fahrten)

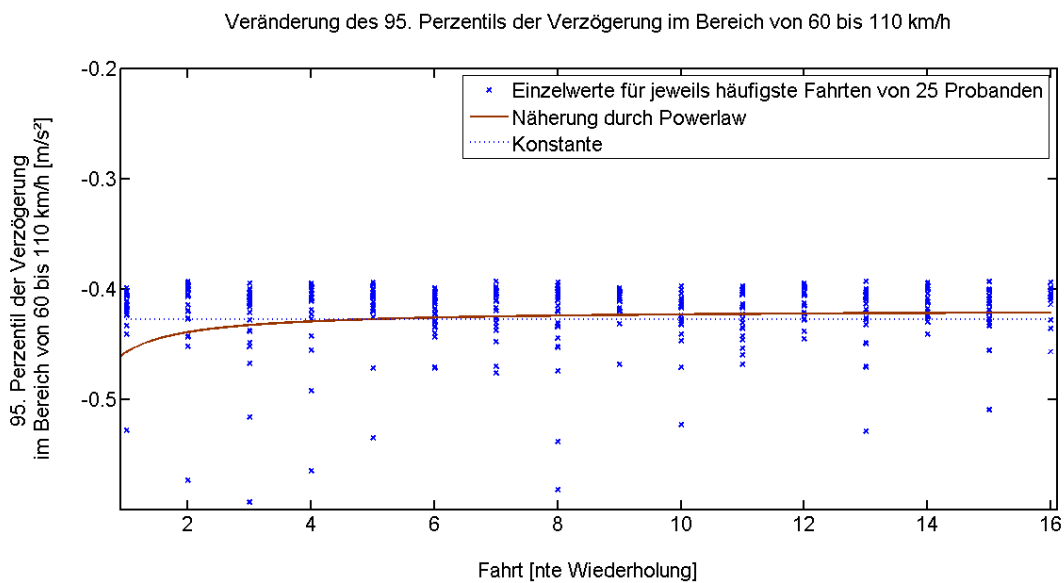


Abbildung 5-11: 95. Perzentil der Verzögerung im Bereich von 60 bis 110 km/h [Berechnung nach Anhang A] für die 25 Probanden mit mehr als 16 Fahrten auf der häufigsten Strecke über der Wiederholung dieser Fahrten mit Darstellung der relevanten Näherungskurven (n=25; häufigste Fahrten)

Die zugehörigen Werte der normalisierten RMSE finden sich in Tabelle 5.6.



Tabelle 5.6: Normalisierter RMSE der Näherungskurven für den Anteil der Verzögerung von -3 bis -2 m/s² und das 95. Perzentil der Verzögerung über 60 km/h

| Näherungskurve | Normalisierter RMSE | |
|----------------|---|--|
| | Anteil der Verzögerung von -3 ... -2 m/s ² [%] | 95. Perzentil der Verzögerung im Bereich von 60 bis 110 km/h [%] |
| Konstant | 1,2627 | 0,1762 |
| Linear | 1,2652 | 0,1756 |
| Powerlaw | 1,2559 | 0,1749 |
| Exponentiell | 1,2604 | 0,1751 |

5.2.1.3 Zusammenfassende Bewertung der Lernkurven in den streckenbezogenen Metriken

Bezüglich der streckenbezogenen Metriken sind im Probandendurchschnitt keine Lernprozesse zur Vermeidung besonders ineffizienter Fahrerverhaltensmuster nachweisbar. Es zeigt sich aber, dass die Rekuperation zunehmend gezielter eingesetzt wird und dass das Beschleunigen bei hohen Geschwindigkeiten zunehmend vermieden wird. Bei Betrachtung der jeweils am häufigsten gefahrenen Fahrten bestätigt sich dieses Bild, wobei diese Effekte bei Probanden, die bestimmte Strecken sehr häufig durchfahren, am deutlichsten sind. Die Lernkurven erreichen bereits nach wenigen Wiederholungen den Bereich ihrer Asymptote. Der Verzicht auf die Betätigung der Fußbremse und die gezielte Dosierung der Rekuperation werden von allen Probanden sehr schnell erlernt.

Daraus darf allerdings kein generelles Bestreben, mit dem Elektrofahrzeug jederzeit sparsam fahren zu wollen, abgeleitet werden. Vielmehr bedeuten die Ergebnisse, dass sich die Probanden ganz allgemein schnell an die Möglichkeit der Energierückgewinnung gewöhnen und diese gezielt in ihr alltägliches Fahrerverhalten einbinden. Gerade auch bezüglich der starken Beschleunigung im hohen Geschwindigkeitsbereich kann zudem nicht ausgeschlossen werden, dass die anfänglichen hohen Werte auf ein erstes Ausprobieren des fahrdynamischen Potentials des Elektrofahrzeuges zurückzuführen sind.

5.2.2 Zeitliche Veränderungen in manöverbezogenen Metriken

Die Betrachtung der manöverbezogenen Metriken soll getrennt für das Verzögern bis zum Stillstand und das anschließende Beschleunigen durchgeführt werden. Abschnitt 5.2.2.3 gibt abschließend eine Übersicht über die Teilergebnisse. Da sich die manöverbezogenen Metriken dabei nicht nur auf komplette Fahrten beziehen, sondern pro Fahrt und Proband eine Mehrzahl an Datenpunkten liefern, ist mit der Vielzahl der Datenpunkte die Erzeugung besonders fein angepasster



Lernkurven möglich. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wird in den Abbildungen auf die Darstellung der einzelnen Datenpunkte verzichtet.

5.2.2.1 Verzögern bis zum Stillstand

Bei querschnittlicher Betrachtung aller Verzögerungsvorgänge sind für die Geschwindigkeit zu Rekuperationsbeginn und für den Anteil mechanischer Verzögerung Lernvorgänge nachweisbar. Im Fall der Geschwindigkeit bei Rekuperationsbeginn bietet das Powerlaw eine deutlich bessere Näherung als die Konstante oder der lineare Trend (vgl. Abbildung 5-12). Die Näherung durch die Exponentialfunktion unterscheidet sich im Verlauf unwesentlich von der durch das Powerlaw.

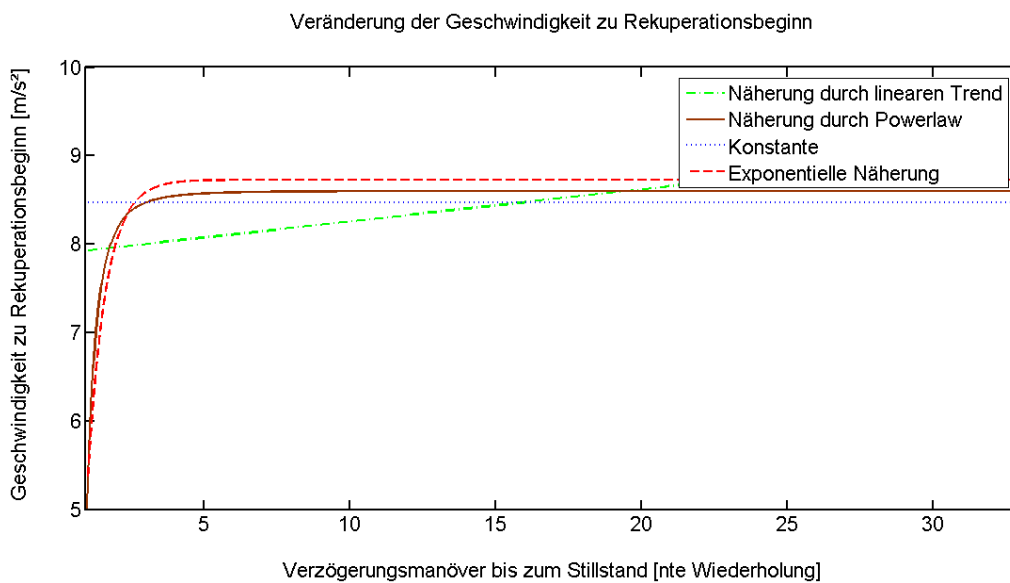


Abbildung 5-12: Näherungskurven für die Veränderung der Geschwindigkeit zu Rekuperationsbeginn [Berechnung nach Anhang A] über der Wiederholung von Verzögerungsmanövern bis zum Stillstand für alle Probanden ($n = 35$; Verzögern bis zum Stillstand)

Bezüglich des Anteils mechanischer Verzögerung versagen die Algorithmen zur Erzeugung der Näherungskurven aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Datenpunkte über die Zeitschritte. Es fällt aber bereits bei Betrachtung der einzelnen Werte in Abbildung 5-13 auf, dass sowohl Anzahl als auch Anteil der Bremsbetätigung im Verzögerungsmanöver rapide nachlassen. Bereits ab dem zehnten Verzögerungsmanöver treten mechanische Bremsbetätigungen nur noch sporadisch auf.

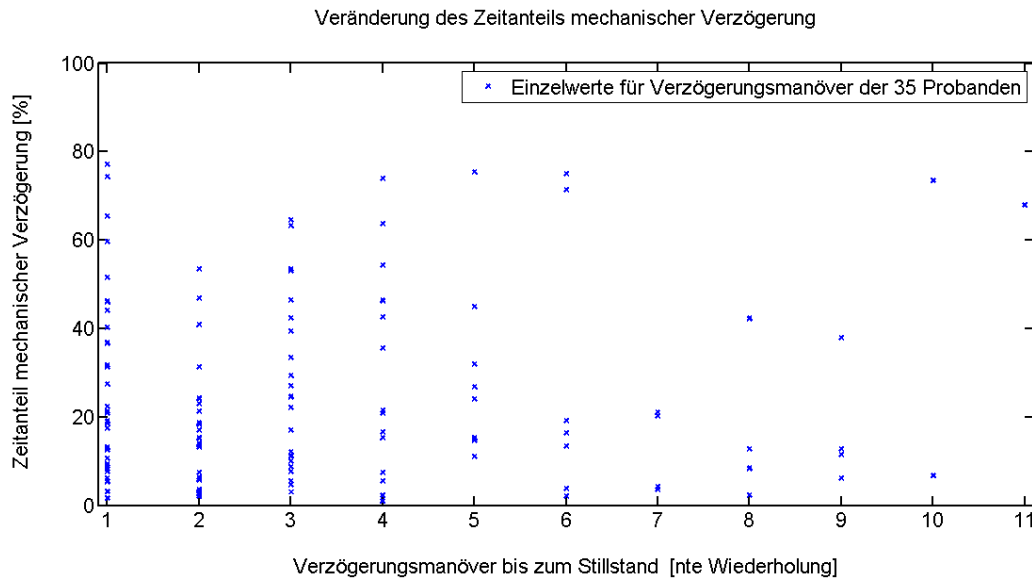


Abbildung 5-13: Zeitanteil mechanischer Verzögerung [Berechnung nach Anhang A] für alle Probanden über der Wiederholung von Verzögerungsmanövern bis zum Stillstand ($n = 35$; Verzögern bis zum Stillstand)

Bei allen Probanden ist demnach bereits innerhalb der ersten zehn Verzögerungsmanöver der Lernprozess des frühen und gezielten Einsetzens der Rekuperationsfunktion abgeschlossen. Das bestätigt die Ergebnisse, die bereits in der streckenübergreifenden Betrachtung gewonnen wurden und liegt im Einklang mit den Erkenntnissen aus Cocron (2014). Eine Übersicht der relativen RMSE ausgewählter Näherungskurven zeigt Tabelle 5.7.

Tabelle 5.7: Normalisierter RMSE der Näherungskurven ausgewählter Metriken für das Verzögern bis zum Stillstand ($n = 35$)

| Näherungskurve | Normalisierter RMSE | | |
|----------------|--|-------------------------------------|---|
| | Geschwindigkeit zu Rekuperationsbeginn [m/s] | Anteil mechanischer Verzögerung [%] | Anteil der Verzögerung von -2 ... -1 m/s ² [%] |
| Konstant | 0,6306 | 0,8280 | 0,5422 |
| Linear | 0,6301 | 0,8337 | 0,5421 |
| Powerlaw | 0,6269 | 0,8278 | 0,5422 |
| Exponentiell | 0,6271 | 0,8274 | 0,5421 |

Bezüglich der Verteilung der Verzögerungswerte im Bereich der Rekuperation lassen sich allerdings keine generellen Lernvorgänge nachweisen. Am Beispiel des Anteils der Verzögerung im Bereich von -2 bis -1 m/s² sei dies in Abbildung 5-14 veranschaulicht.

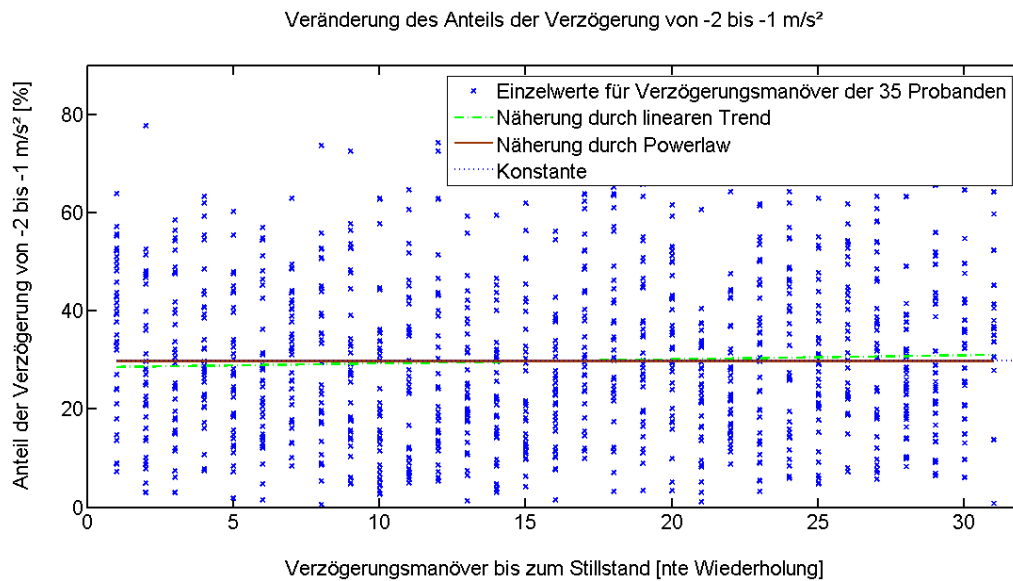


Abbildung 5-14: Anteil der Verzögerung von -2 bis -1 m/s^2 [Berechnung nach Anhang A] für alle Probanden über der Wiederholung von Verzögerungsmanövern bis zum Stillstand mit Darstellung der relevanten Näherungskurven ($n = 35$; Verzögern bis zum Stillstand)

5.2.2.2 Beschleunigen aus dem Stillstand

Bezüglich des Beschleunigens aus dem Stillstand lassen sich durchweg über alle Probanden sehr gute Näherungen durch das Powerlaw bestätigen, allerdings nicht mit der Tendenz zu effizienterem Fahren, wie es analog zu den Lernprozessen beim Verzögern zu erwarten wäre, sondern in entgegengesetzter Richtung. Wie in Abbildung 5-15 für das Maximum, das 80. Perzentil und den Median der Beschleunigung aus dem Stillstand zu sehen ist, steigen die Näherungskurven stark an, bis sie nach etwa 20 Wiederholungen von Beschleunigungsmanövern ihre Asymptote erreichen.

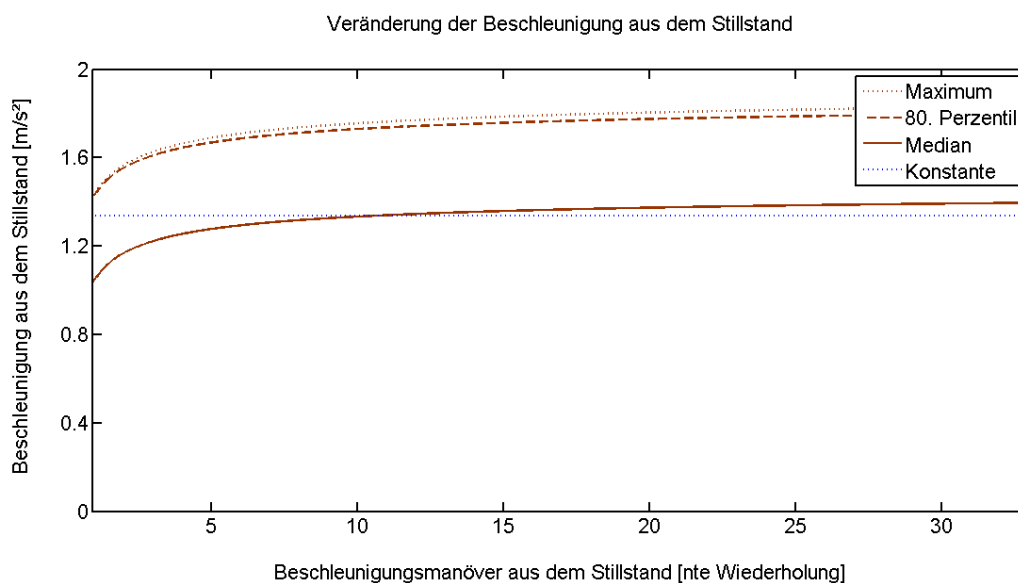


Abbildung 5-15: Näherungskurven für die Veränderung der charakteristischen Beschleunigungswerte [Berechnung nach Anhang A] über der Wiederholung von Beschleunigungsmanövern aus dem Stillstand für alle Probanden ($n = 35$)



Bestätigt wird dieser Verlauf der Fahrerverhaltensänderung auch bei gezielter Betrachtung der ersten 4 s des Anfahrens, die nach Deml et al. (2007) besonders aussagekräftig sind. Die zugehörigen Werte für die normalisierten RMSE finden sich in Tabelle 5.8.

Tabelle 5.8: Normalisierter RMSE der Näherungskurven für die Beschleunigung aus dem Stillstand und während der ersten 4 s des Anfahrmanövers ($n = 35$)

| Näherungskurve | Normalisierter RMSE | | | | |
|----------------|---|---------------|--------|---|--------|
| | Beschleunigung aus dem Stillstand [m/s ²] | | | Beschleunigung während der ersten 4 s des Anfahrens [m/s ²] | |
| | Maximum | 80. Perzentil | Median | 80. Perzentil | Median |
| Konstant | 0,4025 | 0,3623 | 0,3991 | 0,3739 | 0,4677 |
| Linear | 0,4001 | 0,3601 | 0,3964 | 0,3717 | 0,4650 |
| Powerlaw | 0,3994 | 0,3593 | 0,3951 | 0,3704 | 0,4629 |
| Exponentiell | 0,4001 | 0,3602 | 0,3959 | 0,3712 | 0,4635 |

Aus dieser detaillierten Analyse der Anfahrmanöver wird deutlich, dass die Probanden das hohe Beschleunigungsvermögen des EVs beim Anfahren zunehmend stärker ausnutzen. Sie eignen sich damit eine für das Fahren im EV typische Verhaltensweise (Alessandrini et al., 2009) an.

5.2.2.3 Zusammenfassende Betrachtung der Lernkurven in den manöverbezogenen Metriken

Während bezüglich der Verzögerung bis zum Stillstand über das gesamte Probandenkollektiv das schnelle Erlernen des rechtzeitigen und gezielten Einsatzes der Rekuperation ersichtlich wird, zeigt sich bei Beschleunigung aus dem Stillstand ein mit zunehmender Fahrerfahrung deutlich sportlicheres Fahrerverhalten. Diese Befunde dürfen weder als Indiz für einen generellen Lernvorgang zu sportlicherem noch zu effizienterem Fahrerverhalten gewertet werden. Sie beweisen einzig, dass die Fahrer von Elektrofahrzeugen innerhalb weniger Wiederholungen der Manöver die für das EV typischen Fahrerverhaltensweisen erlernen. Sie wenden damit beim Verzögern bis zum Stillstand zunehmend gezielter die Rekuperation an und machen beim Anfahren aus dem Stillstand zunehmend stärker Gebrauch von dem hohen Drehmoment der E-Maschine.

5.2.3 Zusammenfassende Betrachtung aller Lernkurven

Sowohl die Auswertung der streckenbezogenen Metriken als auch die gezielte Auswertung charakteristischer Manöver haben gezeigt, dass sämtliche Probanden innerhalb weniger Fahrten den gezielten Einsatz der Rekuperation erlernen und dieses erlernte Fahrerverhalten auch nachhaltig



anwenden. Es kann also in diesem Zusammenhang das in Kapitel 2.4.3 vorgeschlagene Modell nach Michon (1985) bestätigt werden. Mit ständiger Wiederholung derselben Aufgaben in der Längsregelung des Fahrzeugs werden diese von der zunächst wissensbasierten Ebene schließlich in die fertigkeitbasierte Ebene übergeführt. Aus der Analyse der unterschiedlichen Metriken ergeben sich dabei die folgenden Lernziele:

- Regelung der Verzögerung nur über das Fahrpedal
- Richtiges Abschätzen des optimalen Zeitpunktes für den Rekuperationsbeginn
- Vorausschauendes Fahren zur gezielten Anwendung der Rekuperation

Die streckenbezogenen Metriken zeigen des Weiteren eine Tendenz zur Vermeidung unnötig starker Beschleunigungen und Verzögerungen im hohen Geschwindigkeitsbereich über 110 km/h. Dies allein könnte als Bestreben zur Reichweitenoptimierung gewertet werden, was sich allerdings in keiner der anderen streckenbezogenen Metriken bestätigt. Ein generell sparsamerer Fahrstil müsste zudem einen erhöhten Konstantfahrtanteil, einen geringeren Variationskoeffizienten der Beschleunigung und eine kleinere Standardabweichung der Beschleunigung erfüllen. Ein generell langsames Fahren kann in diesem Zusammenhang ebenfalls nicht nachgewiesen werden.

Im Gegensatz zu dieser Vermutung belegt die gezielte Auswertung der Anfahrmanöver sogar, dass die Fahrer eines EVs das hohe Drehmoment aus dem Stillstand zunehmend ausnutzen und mit ihrem Fahrerverhalten in dieser Situation auf Kosten der Reichweite von der sportlichen Performanz Gebrauch machen. Die Fahrer von Elektrofahrzeugen optimieren also ihr Fahrerverhalten nicht generell hinsichtlich der Energieeffizienz. **Hypothese 1** aus Forschungsfrage 3.1 kann somit nicht bestätigt werden:

➔ *Die Fahrer dieser Stichprobe wenden mit zunehmender Fahrerfahrung kein effizienteres Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug an.*

Aus diesen im Probandendurchschnitt gewonnenen Ergebnissen lässt sich aber für die Fahrer im Einzelnen keine Aussage darüber tätigen, ob Lernvorgänge überhaupt nicht stattfinden, oder nur nicht in einer einheitlichen Richtung verlaufen. Gegenläufige Lernkurven einzelner Probanden oder auch unterschiedliche Lernkurven für unterschiedliche Fahrtzwecke oder Routen eines Probanden könnten sich gegenseitig aufheben. Dies kann nur anhand der probanden- und streckenindividuellen Auswertung in Kapitel 5.3 überprüft werden.



5.3 Abhängigkeiten der individuellen Veränderungen im Fahrerverhalten

Um die unterschiedlichen Einflüsse auf die Veränderungen im Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug zu identifizieren, werden zunächst die Trendanalysen für die streckenbezogenen Metriken auf individuellem Niveau betrachtet und anschließend ein Abgleich mit der jeweiligen Streckencharakteristik vorgenommen. Im Vordergrund stehen dabei jeweils die am häufigsten gefahrenen Fahrten.

5.3.1 Vorbemerkung zum linearen Trend und dem Powerlaw

Aufgrund der geringen Anzahl an Datenpunkten eignet sich die Näherung durch die Powerfunktion nicht für die individuelle Betrachtung. Wendet man die Algorithmen zur Erzeugung von Näherungskurven nach Kapitel 4.8.1 dennoch auf die individuellen Fahrten an, so zeigt sich in allen Metriken ausnahmslos ein geringerer normalisierter RMSE für die Exponentialfunktion als für die anderen Näherungsfunktionen. Dies steht nicht nur im Gegensatz zu den im Probandendurchschnitt gewonnenen Erkenntnissen, in denen auch deutlich besser normalisierte RMSE für das Powerlaw oder gar die Konstante ermittelt wurden, sondern belegt, dass die Kurvennäherungen bei einer solch geringen Anzahl an Datenpunkten an ihre Grenzen stößt. Da sich aber in der probandendurchschnittlichen Betrachtung gezeigt hat, dass die Metriken, in denen das Powerlaw eine gute Näherung verspricht, auch einen signifikanten linearen Trend aufweisen, soll im Weiteren dieser als Entscheidungskriterium für die Bewertung der Veränderungen im Fahrerverhalten herangezogen werden. Es sind damit zwar keine Aussagen mehr bezüglich des allgemeinen Verlaufs einer Lernkurve möglich, aber wohl über den individuellen Trend der Veränderung des Fahrerverhaltens.

5.3.2 Individuelle Trends im Fahrerverhalten

Wie auch schon bei der Auswertung des Probandendurchschnitts, so sind auch im individuellen Fall nicht einzelne Metriken entscheidend, sondern das Gesamtergebnis des vollständigen Metrikensatzes. Zur Veranschaulichung des prinzipiellen Vorgehens zur Identifikation von individuellen Veränderungen im Fahrerverhalten wird im Folgenden am Beispiel eines beliebigen Probanden (VP 004) das methodische Schema exemplarisch vorgeführt. Die Ergebnisse aller übrigen Probanden sind nach demselben Schema entsprechend der jeweiligen repräsentativen Fahrten (vgl. Kapitel 4.4) ermittelt worden und in der Gesamtübersicht in Tabelle 5.12 dargestellt.

Betrachtet man zunächst alle Fahrten des Probanden VP 004 in chronologischer Reihenfolge, lässt sich für den Anteil der Beschleunigung und den Anteil der Verzögerung ein signifikant fallender Trend zu Gunsten des Konstantfahrtanteils nachweisen (Abbildung 5-16).

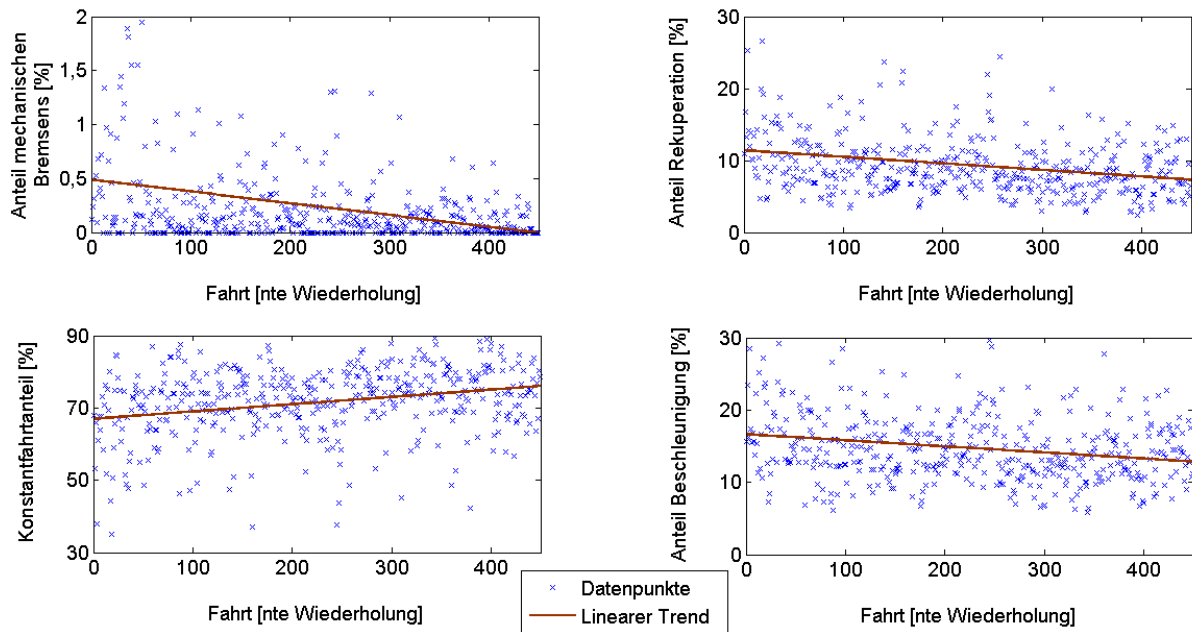


Abbildung 5-16: Trends der entscheidenden Metriken für effizientes Fahren (VP 004; alle Fahrten)

Ebenso fallen der Variationskoeffizient und das 95. Perzentil der Beschleunigung im gesamten Geschwindigkeitsspektrum signifikant. Weiterhin nehmen die mittlere Celeration und die Standardabweichung der Beschleunigung signifikant ab. Die entsprechenden Werte für die Steigungen und die Signifikanz des Trends zeigt Tabelle 5.9.

Tabelle 5.9: Linearer Trend der entscheidenden Metriken für effizientes Fahren am Beispiel des Probanden 004 (VP 004; alle Fahrten)

| Metrik | Steigung des Trends | p Regressionsanalyse |
|--|---------------------|----------------------|
| Anteil mechanischer Verzögerung [%] | -0,109 | < 0,001 |
| Anteil regenerativer Verzögerung [%] | -0,909 | < 0,001 |
| Konstantfahrtanteil [%] | 2,017 | < 0,001 |
| Anteil der Beschleunigung [%] | -0,841 | < 0,001 |
| Variationskoeffizient [] | -0,148 | < 0,001 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung von 0 bis 40 km/h [m/s ²] | -0,129 | < 0,001 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung von 40 bis 60 km/h [m/s ²] | -0,188 | < 0,001 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung von 60 bis 110 km/h [m/s ²] | -0,255 | < 0,001 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung über 110 km/h [m/s ²] | -1,353 | 0,040 |
| Mittlere Celeration [m/s ²] | -0,003 | < 0,001 |
| Standardabweichung der Beschleunigung [m/s ²] | -0,005 | < 0,001 |



In einem zweiten Schritt werden die einzelnen Fahrten auf den regelmäßig gefahrenen repräsentativen Strecken (vgl. Kapitel 4.4) gesondert untersucht. Abbildung 5-17 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung der regelmäßig gefahrenen Strecken von Proband VP 004 mit Übersicht der jeweiligen Streckencharakteristika. Nur vier der insgesamt 13 verschiedenen Strecken wurden oft genug gefahren⁹ um in den Satz repräsentativen Strecken mit aufgenommen zu werden.

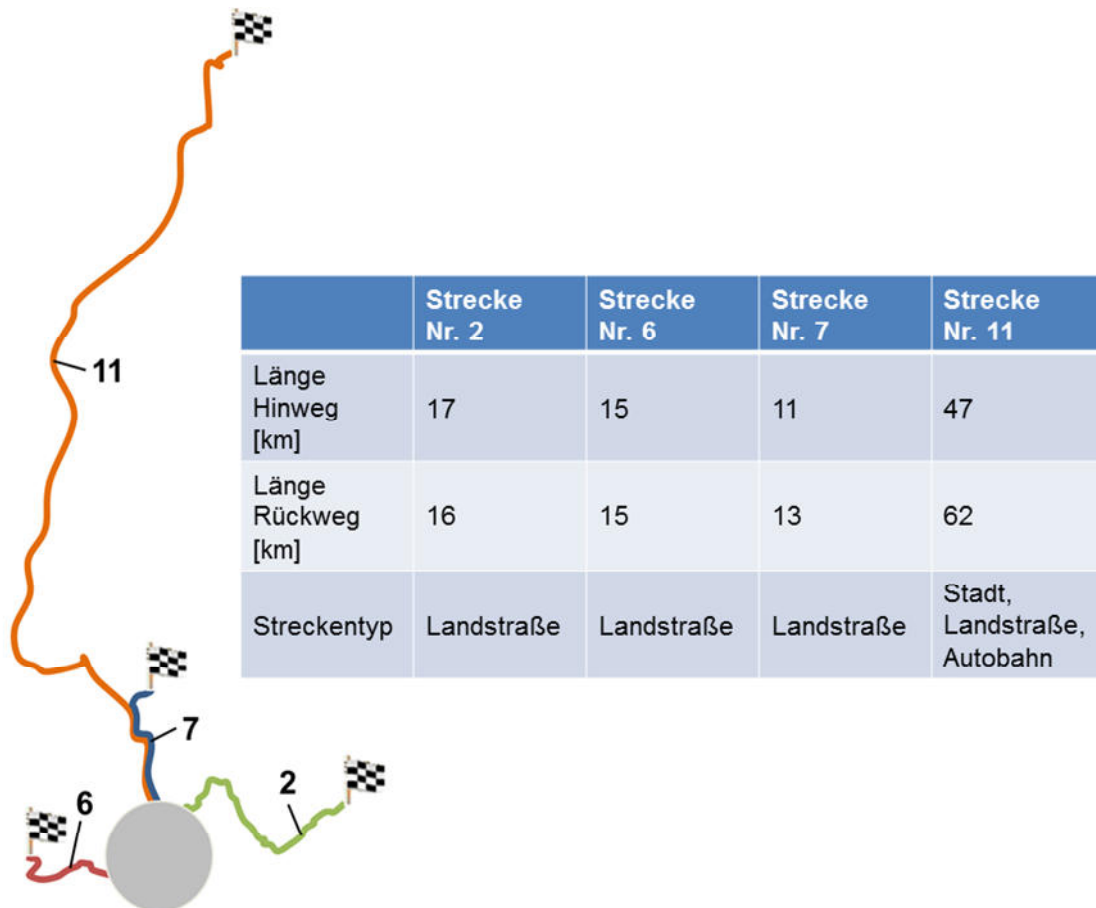


Abbildung 5-17: Schematische Darstellung des Streckenverlaufs der repräsentative Fahrten von Proband VP 004 und Angabe der Streckencharakteristika

Ebenso auf der etwa 50 km langen Strecke Nr. 11, wie auf der 16 km langen Strecke Nr. 2 zeigt sich unabhängig von der Fahrtrichtung das gleiche Ergebnis wie für die Gesamtbetrachtung aller Fahrten von Proband VP 004. Für Strecke Nr. 6 mit 15 km Länge sind nur in vereinzelt Metriken, wie dem Anteil mechanischer Verzögerung, signifikante Veränderungen vorzufinden. Diese lassen in der ganzheitlichen Betrachtung des gesamten Metrikensatzes nicht zweifelsfrei auf eine Effizienzoptimierung des Fahrerverhaltens schließen. Auch ist das Bild der 13 km langen Strecke Nr. 7 bei Weitem nicht so eindeutig wie das für die Strecken Nr. 11 und Nr. 2. Zwar zeigt sich ein signifikant geringerer Einsatz der stärkeren Verzögerung zusammen mit einer signifikant weniger starken Beschleunigung.

⁹ nach Kapitel 4.4 muss eine repräsentative Strecke im Durchschnitt mindestens zweimal pro Monat befahren werden



Jedoch ist deren Einfluss zu gering, um signifikante Verminderungen des Variationskoeffizienten oder der mittleren Celeration zu bewirken. Da diese Metriken aber bereits selbst einen positiven Einfluss auf die Energieeffizienz haben, kann hier von einem tendenziell effizienteren Fahrerverhalten gesprochen werden. Tabelle 5.10 zeigt den Überblick über alle relevanten Metriken auf den unterschiedlichen repräsentativen Strecken.

Tabelle 5.10: Linearer Trend der entscheidenden Metriken für effizientes Fahren (VP 004; regelmäßige Fahrten)

| Metrik | Strecke Nr. 2 | | Strecke Nr. 6 | | Strecke Nr. 7 | | Strecke Nr. 11 | |
|---|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|----------------|-------------|
| | Steigung | Signifikanz | Steigung | Signifikanz | Steigung | Signifikanz | Steigung | Signifikanz |
| Anteil mechanischer Verzögerung | - | 0,030 | - | 0,033 | + | 0,859 | - | 0,082 |
| Anteil regenerativer Verzögerung | - | 0,002 | - | 0,778 | - | 0,008 | - | 0,238 |
| Anteil leichter Rekuperation | + | 0,366 | - | 0,411 | + | 0,553 | - | 0,787 |
| Konstantfahrtanteil | + | 0,023 | + | 0,305 | + | 0,319 | + | 0,320 |
| Anteil der Beschleunigung | - | 0,127 | - | 0,112 | - | 0,161 | - | 0,327 |
| Anteil der Beschleunigung von -3 bis -2 m/s ² | - | <0,001 | - | 0,303 | - | 0,043 | - | 0,046 |
| Anteil der Beschleunigung von mehr als 2,5 m/s ² | - | <0,001 | - | 0,660 | - | 0,043 | - | 0,001 |
| Variationskoeffizient | - | <0,001 | - | 0,216 | - | 0,124 | - | 0,024 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung von 0 bis 40 km/h | - | <0,001 | - | 0,903 | - | 0,241 | - | <0,001 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung von 40 bis 60 km/h | - | <0,001 | - | 0,439 | - | 0,448 | - | 0,001 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung von 60 bis 110 km/h | - | <0,001 | - | 0,098 | - | 0,016 | - | 0,002 |
| Mittlere Celeration | - | <0,001 | - | 0,286 | - | 0,148 | - | 0,120 |
| Standardabweichung der Beschleunigung | - | <0,001 | - | 0,216 | - | 0,124 | - | 0,024 |

Um diese Ergebnisse in der weitergehenden Auswertung in Kapitel 5.3.3 mit der Streckenlänge, dem Streckentyp und der Fahrtrichtung korrelieren zu können, werden sie nach dem in Kapitel 4.8.2 dargestellten Schema wie in Tabelle 5.11 aufgeführt klassifiziert.



Tabelle 5.11: Zusammenfassung der Veränderungen im Fahrerverhalten des Probanden 004 und zugehörige Fahrtencharakteristika

| <i>Zusammenfassung Proband 004</i> | | | | |
|------------------------------------|---|----------------------|--------------------|-----------------|
| <i>Strecke Nr.</i> | <i>Veränderung des Fahrerverhaltens</i> | <i>Streckenlänge</i> | <i>Streckentyp</i> | <i>Richtung</i> |
| 11 Hinweg | Effizienter | 47 km | Landstraße | + |
| 11 Rückweg | Effizienter | 62 km | Landstraße | - |
| 2 Hinweg | Effizienter | 17 km | Landstraße | + |
| 2 Rückweg | Effizienter | 16 km | Landstraße | - |
| 6 Hinweg | Gleichbleibend | 15 km | Landstraße | + |
| 6 Rückweg | Gleichbleibend | 15 km | Landstraße | - |
| 7 Hinweg | Tendenziell effizienter | 11 km | Landstraße | + |
| 7 Rückweg | Tendenziell effizienter | 13 km | Landstraße | - |

Analog zu dem Vorgehen für Proband 004 wurden alle Fahrten aller Probanden einzeln analysiert, bewertet und klassifiziert. Eine vollständige Auflistung der identifizierten Veränderungen des Fahrerverhaltens auf allen repräsentativen Fahrten aller Probanden ist in Tabelle 5.12 dargestellt.



Tabelle 5.12: Übersicht der Veränderung des individuellen Fahrerverhaltens (n=35; alle Fahrten und regelmäßig wiederholte Fahrten auf vergleichbaren Strecken)

| VP-Nr. | allen Fahrten | Strecke 1 (Hin-/ Rückweg) | Strecke 2 (Hin-/ Rückweg) | Strecke 3 (Hin-/ Rückweg) | Strecke 4 (Hin-/ Rückweg) |
|--------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| 001 | sportlicher | gleichbleibend/ sportlicher | gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 002 | sportlicher | sportlicher/ tend. sportlicher | gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 003 | tend. sportlicher | gleichbleibend/ tend. effizienter | tend. effizienter | gleichbleibend | n.v. |
| 004 | effizienter | effizienter | effizienter | gleichbleibend | tend. effizienter |
| 005 | effizienter | effizienter/ gleichbleibend | tend. effizienter | gleichbleibend | gleichbleibend |
| 006 | gleichbleibend | tend. effizienter | tend. effizienter | tend. effizienter | n.v. |
| 007 | gleichbleibend | tend. sportlicher / sportlicher | sportlicher/ tend. effizienter | n.v. | n.v. |
| 008 | gleichbleibend | gleichbleibend/ sportlicher | gleichbleibend/ effizienter | gleichbleibend/ effizienter | n.v. |
| 009 | tend. effizienter | n.v. | n.v. | n.v. | n.v. |
| 010 | sportlicher | tend. sportlicher | gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 011 | tend. effizienter | sportlicher/ gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend | n.v. |
| 012 | effizienter | effizienter | effizienter | effizienter | gleichbleibend/ sportlicher |
| 013 | gleichbleibend | gleichbleibend | sportlicher | gleichbleibend | n.v. |
| 014 | gleichbleibend | sportlicher/ gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend | n.v. |
| 015 | gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend | tend. sportlicher/ gleichbleibend | n.v. |
| 101 | tend. sportlicher | gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend | n.v. |
| 102 | gleichbleibend | tend. sportlicher | gleichbleibend | effizienterer/ gleichbleibend | gleichbleibend |
| 103 | tend. sportlicher | gleichbleibend/ sportlicher | gleichbleibend | tend. sportlicher | n.v. |
| 104 | sportlicher | sportlicher/ tend. sportlicher | gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 105 | tend. effizienter | gleichbleibend/ tend. effizienter | n.v. | n.v. | n.v. |
| 106 | gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend/ tend. sportlicher | n.v. | n.v. |
| 107 | tend. sportlicher | tend. sportlicher/ gleichbleibend | tend. effizienter/ gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 108 | sportlicher | gleichbleibend/ tend. sportlicher | tend. effizienter | gleichbleibend/ tend. sportlicher | defensiver/ gleichbleibend |
| 109 | tend. effizienter | gleichbleibend/ tend. effizienter | gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 110 | tend. sportlicher | gleichbleibend/ tend. sportlicher | gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 111 | effizienter | effizienter / tend. effizienter | effizienter/ gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 112 | gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend/ sportlicher | gleichbleibend | n.v. |
| 113 | sportlicher | gleichbleibend | gleichbleibend/ sportlicher | gleichbleibend | n.v. |
| 114 | gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend | n.v. |
| 115 | gleichbleibend | tend. effizienter/ gleichbleibend | n.v. | n.v. | n.v. |
| 201 | tend. effizienter | gleichbleibend/ tend. effizienter | gleichbleibend/ effizienter | n.v. | n.v. |
| 202 | sportlicher | sportlicher/ tend. effizienter | effizienter/ gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 203 | sportlicher | sportlicher/ gleichbleibend | sportlicher/ gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 204 | gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend | n.v. | n.v. |
| 205 | gleichbleibend | gleichbleibend | gleichbleibend | n.v. | n.v. |



Es zeigen sich sehr individuelle Veränderungen im Fahrerverhalten mit zunehmender Nutzung des Elektrofahrzeuges. Manche Probanden entwickeln auf einem Hinweg immer effizienteres Fahrerverhalten und tendieren dafür auf dem zugehörigen Rückweg zu einer immer sportlicheren Fahrweise. Andere Probanden wiederum zeigen eine genau umgekehrte Veränderung ihres Fahrerverhaltens. Ein allgemeiner Trend ist weder für die Entwicklung zu einem sportlicheren noch zu einem effizienteren Fahrerverhalten erkennbar.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit ist die Anzahl der identifizierten Fahrerverhaltensänderungen aus Tabelle 5.12 in Tabelle 5.13 nach relevanter Strecke und Art der Veränderung aufgeführt.

Tabelle 5.13: Häufigkeit der identifizierten Fahrerverhaltensänderungen nach relevanter Strecke und Art der Veränderung (n = 35; Mehrfacheinteilung möglich)

| Anzahl der Probanden mit | effizienterem | tendenziell effizienterem | gleichbleibendem | tendenziell sportlicherem | sportlicherem |
|--------------------------|-----------------|---------------------------|------------------|---------------------------|---------------|
| | Fahrerverhalten | | | | |
| auf | | | | | |
| allen Fahrten | 4 | 5 | 13 | 5 | 8 |
| vergleichbare Strecken | 8 | 13 | 33 | 10 | 14 |
| Hinweg | 5 | 2 | 13 | 2 | 7 |
| Rückweg | 2 | 4 | 11 | 3 | 7 |

Insgesamt ist die Entwicklung zu sportlicherem Fahrerverhalten auf allen Fahrten ebenso wie auf den jeweils repräsentativen Strecken etwas öfter zu beobachten, als die zu effizienterem. Auffällig ist aber vor allem, dass die Zahl der gleichbleibenden Trends stets schwer überwiegt. Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass fünf Probanden auf Hinfahrten zu effizienterem Fahrerverhalten tendieren, während dies nur für zwei Probanden für die Rückfahrten der Fall ist. Bezüglich der Tendenz zu sportlicherem Fahrerverhalten ist dieselbe Häufigkeit für die getrennte Betrachtung von Hin- und Rückfahrten zu beobachten. Deutlich wird dieser Gesamtzusammenhang nochmals, indem die Werte aus Tabelle 5.13 in Abbildung 5-18 aufgetragen werden.

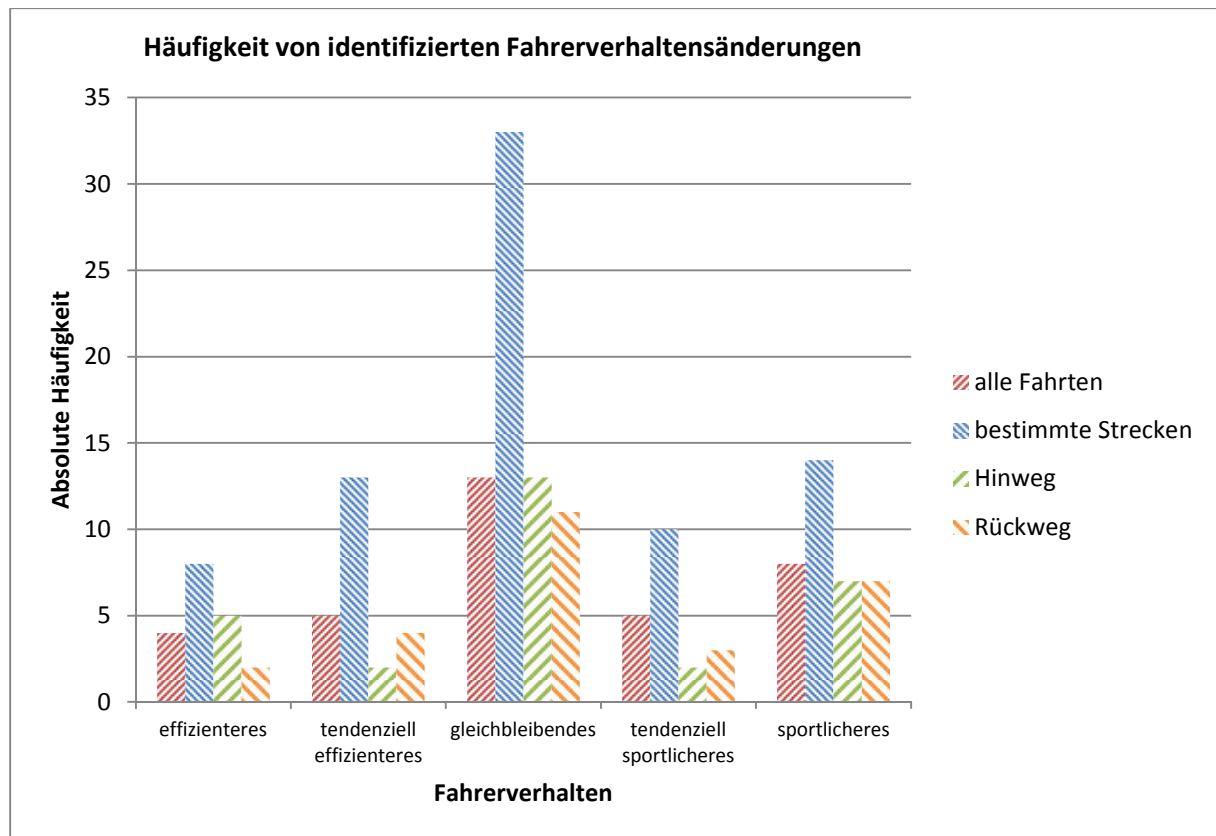


Abbildung 5-18: Häufigkeit von identifizierten Fahrerhaltensänderungen auf allen und auf jeweils vergleichbaren Strecken (n = 35)

Es steht also fest, dass auch bei individueller Betrachtung ein genereller Trend zu effizienterem Fahrerhalten mit zunehmender Fahrerfahrung im EV ausgeschlossen werden kann. Individuelle und streckenabhängige Veränderungen des Fahrerhaltens sind jedoch in Richtung eines immer effizienteren aber auch in Richtung eines immer sportlicheren Fahrstils möglich. Inwiefern diese individuellen Veränderungen von Einflussgrößen abhängen, wird im folgenden Abschnitt geklärt werden.

5.3.3 Die Abhängigkeiten von Streckenlänge, Streckentyp und Fahrtrichtung

Nach Einteilung und Klassifizierung der probandenindividuellen Veränderungen im Fahrerhalten werden diese zusammen mit den ebenfalls objektivierten Einflussgrößen des jeweils individuellen Nutzungsszenarios Streckenlänge, Streckentyp und Fahrtrichtung korreliert. Die Ergebnisse nach Spearman Rangkorrelation zeigt Tabelle 5.14.



Tabelle 5.14: Korrelationen der Fahrerverhaltensänderungen mit den individuellen Umgebungsbedingungen (n = 170 Fahrten; n = 35 Probanden)

| Korrelation von Fahrerverhaltensveränderungen | | |
|---|---------------------|-------|
| mit: | Korrelation | p |
| - Streckenlänge | $r_s(170) = 0,097$ | 0,210 |
| - Streckentyp | $r_s(170) = 0,093$ | 0,229 |
| - Fahrtrichtung | $r_s(170) = -0,032$ | 0,681 |

Wie auch anhand Abbildung 5-19 für die Streckenlänge gut zu erkennen ist, zeigen sich nur extrem geringe Korrelationen und damit kein nachweisbarer signifikanter Zusammenhang von Veränderungen im Fahrerverhalten und individuellen Rahmenbedingungen.

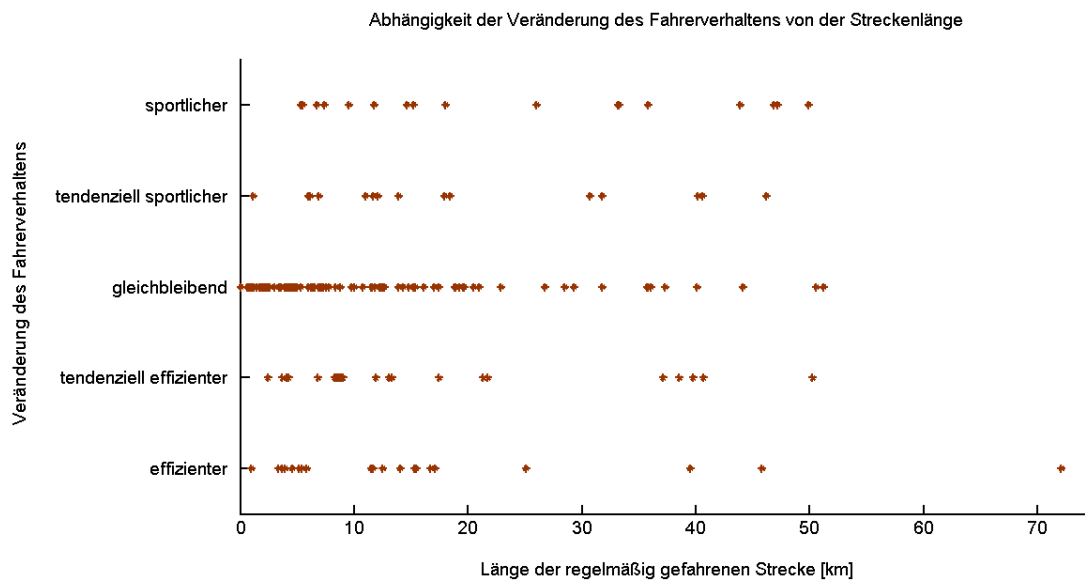


Abbildung 5-19: Abhängigkeit der Veränderung des Fahrerverhaltens von der Streckenlänge (n = 35)

Demnach entscheiden weder die Streckenlänge, noch der Streckentyp oder die Fahrtrichtung über die Veränderung des Fahrerverhaltens unter Effizienzaspekten. Dies bedeutet aber auch, dass das EV unter allen individuellen Rahmenbedingungen die Entfaltung aller individuellen Fahrstile ermöglicht. Die Veränderungen im Fahrerverhalten sind somit auf individuelle Präferenzen in der Wahl der persönlichen Fahrweise im Elektrofahrzeug zurückzuführen.



5.3.4 Zusammenfassende Betrachtung der individuellen Veränderungen im Fahrerverhalten

Veränderungen im Fahrerverhalten verlaufen ebenso in Richtung immer effizienterer, wie auch umgekehrt in Richtung immer sportlicherer Fahrweise und sind dabei unabhängig von den individuellen Rahmenbedingungen. Die **Hypothese 2** aus Forschungsfrage 3.2 kann damit nicht bestätigt werden:

→ *Veränderungen im Fahrerverhalten sind nicht abhängig von der jeweiligen Streckenlänge, der Art des Streckentyps und der Fahrtrichtung.*

Gerade auch in diesem Zusammenhang sollte erwähnt werden, dass 95% der regelmäßigen Fahrten weniger als 45 km einfache Streckenlänge aufweisen, also auch ohne Nachlademöglichkeit am Umkehrpunkt in der prinzipiell verfügbaren Reichweite des MINI E liegen. Nichtsdestotrotz könnten Fahrer von Elektrofahrzeugen, die mehrere Fahrten am Stück bewältigen wollen, von einer Reichweitenerhöhung profitieren.

Scheinbar entscheiden aber nicht die Rahmenbedingungen der Elektromobilität über die Umsetzung eines effizienzoptimierten Fahrerverhaltens, sondern die Fahrer selbst. Nur so kann erklärt werden, dass unter anderem auch ein und dieselben Fahrer unabhängig von streckengebundenen Einflussgrößen auf manchen Routen sportlicheres und auf anderen Routen effizienteres Fahrerverhalten präferieren. Fest steht auch, dass auf der Mehrzahl der Routen keinerlei Veränderungen im Fahrerverhalten hinsichtlich der Energieeffizienz erkennbar sind. Das Elektrofahrzeug erlaubt dem breiten Spektrum an Fahrern somit die volle Entfaltung individueller Fahrstile, ohne sie in eine bestimmte Richtung umzuerziehen.

Dadurch kann zwar die generelle Anwendung eines reichweitenoptimierten Fahrerverhaltens im Elektrofahrzeug ausgeschlossen werden. Es bedeutet allerdings nicht, dass die Fahrer dies nicht prinzipiell beherrschen würden. Um dies herauszufinden, wird in den folgenden Kapiteln zunächst der Einfluss der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges auf das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug und schlussendlich das von allen Probanden auf Anweisung hin erzielbare Einsparpotential untersucht.

5.4 Einfluss der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges auf das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug

Zur Evaluation des Einflusses der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges auf das Fahrerverhalten im Elektrofahrzeug wurden die letzte Fahrt einer ununterbrochenen Reihe von im EV vollzogenen Fahrten (prä-ICE-Fahrt) mit der ersten Fahrt im EV, nach dem ein Verbrenner gefahren wurde (post-ICE-Fahrt), verglichen (vgl. Kapitel 4.9). Um auch den möglichen Einfluss der Strecke zu berücksichtigen, wurde dieser Vergleich einmal mit der letzten ununterbrochen im EV auf



derselben Strecke gefahrenen Fahrt (vergleichbare Prä-ICE-Fahrt) und einmal mit der tatsächlich allerletzten Fahrt vor Unterbrechung durch das Verbrennerfahrzeug durchgeführt.

5.4.1 Unterschiede im Fahrerverhalten vor und nach der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeugs

In die Auswertung können elf Probanden einbezogen werden, die zuverlässig Buch über sämtliche Fahrten im Beobachtungszeitraum geführt haben. In keiner der Metriken zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Fahrten vor und nach der zwischenzeitlichen Nutzung eines Verbrennerfahrzeugs. Beispielhaft ist dies anhand der Anteile von mechanischer Verzögerung, der regenerativen Verzögerung, der Beschleunigung und der Konstantfahrt in Abbildung 5-20 veranschaulicht.

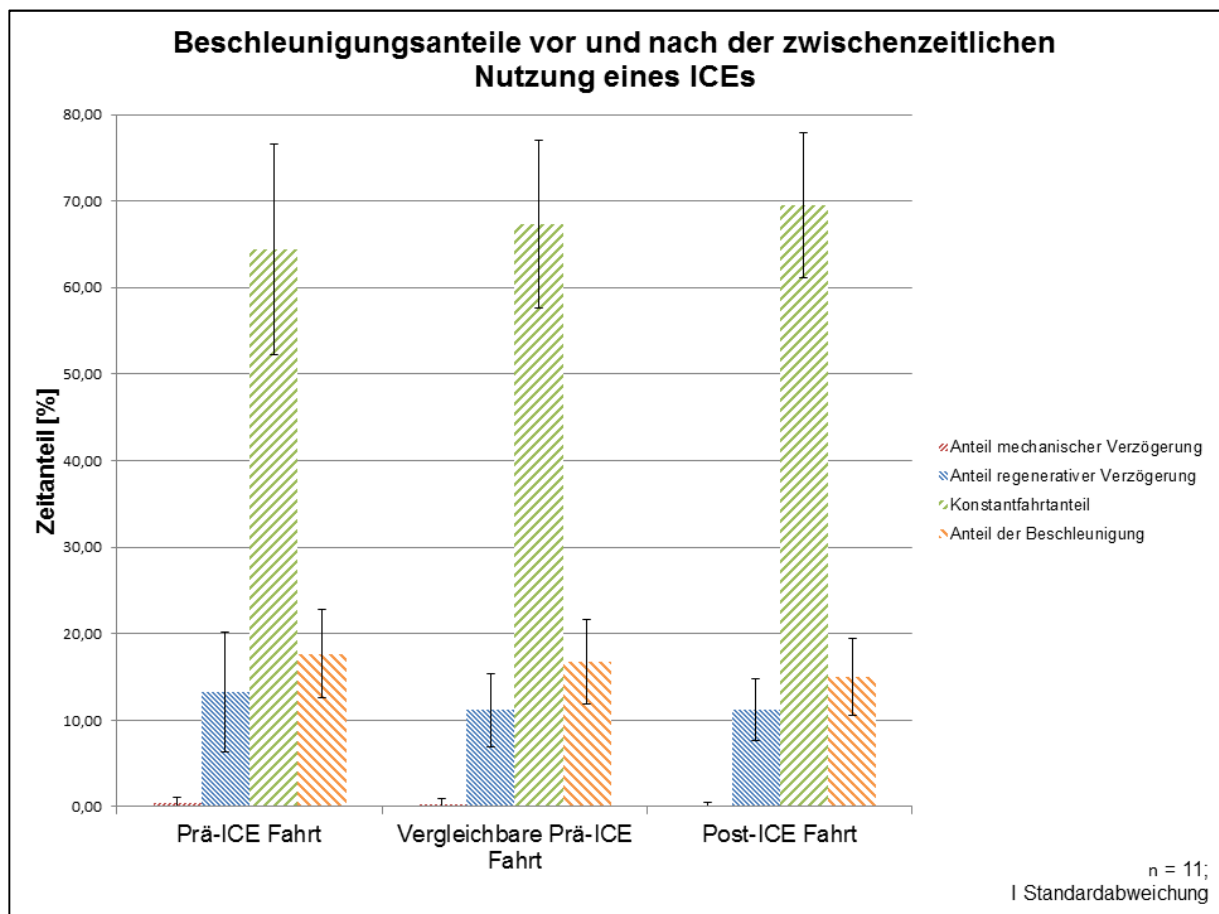


Abbildung 5-20: Unterschiede im Fahrerverhalten nach der Nutzung eines ICE (n = 11; Anteil der Beschleunigung – alle Metriken vgl. Tabelle 5.15)

Das Ergebnis der Varianzanalyse findet sich in Tabelle 5.15. Hervorzuheben ist insbesondere die Tatsache, dass der Anteil mechanischer Verzögerung durch die zwischenzeitliche Nutzung eines Verbrennerfahrzeugs nicht signifikant erhöht wird. Dies bedeutet, dass die Probanden den gezielten



Umgang mit der Rekuperationsfunktion nicht erneut erlernen müssen, sondern auf das bereits auf der fertigkeitbasierten Ebene ablaufende Verhalten zurückgreifen können.

Tabelle 5.15: Ergebnisse des Vergleichs der letzten Fahrten vor Unterbrechung durch das ICE und der ersten Fahrt danach (n = 11; ANOVA)

| Metrik | Prä-ICE Fahrt | | Vergleichbare Prä-ICE Fahrt | | Post-ICE Fahrt | | ANOVA | | |
|--|---------------|------|--------------------------------|------|----------------|------|-------|------|-------|
| | M | SD | M | SD | M | SD | df | F | p |
| Anteil mechanischer Verzögerung | 0,4 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 2 | 0,35 | 0,710 |
| Anteil regenerativer Verzögerung | 13,2 | 7,0 | 11,2 | 4,2 | 11,2 | 3,6 | 1,33 | 0,75 | 0,440 |
| Konstantfahrtanteil | 64,4 | 12,2 | 67,3 | 9,8 | 69,5 | 8,4 | 2 | 0,18 | 0,835 |
| Anteil der Beschleunigung | 17,7 | 5,1 | 16,8 | 4,9 | 15,0 | 4,4 | 2 | 0,78 | 0,473 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung 0 bis 40 km/h | 2,14 | 0,31 | 2,03 | 0,24 | 2,16 | 0,42 | 2 | 0,54 | 0,593 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung 40 bis 60 km/h | 1,25 | 0,68 | 1,40 | 0,53 | 1,30 | 0,49 | 2 | 0,28 | 0,761 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung 60 bis 110 km/h | 1,00 | 0,37 | 1,23 | 0,43 | 1,32 | 0,49 | 2 | 0,98 | 0,393 |
| 95. Perzentil der Verzögerung 0 bis 40 km/h | -0,44 | 0,06 | -0,44 | 0,02 | -0,43 | 0,01 | 1,06 | 0,23 | 0,655 |
| 95. Perzentil der Verzögerung 40 bis 60 km/h | -0,48 | 0,09 | -0,44 | 0,04 | -0,42 | 0,02 | 2 | 3,19 | 0,063 |
| 95. Perzentil der Verzögerung 60 bis 110 km/h | -0,43 | 0,05 | -0,43 | 0,02 | -0,43 | 0,02 | 2 | 0,91 | 0,419 |
| mittlere Celeration | 0,47 | 0,16 | 0,42 | 0,11 | 0,40 | 0,10 | 2 | 0,89 | 0,426 |
| Standardabweichung der Beschleunigung | 0,70 | 0,19 | 0,65 | 0,14 | 0,63 | 0,14 | 2 | 0,71 | 0,503 |

5.4.2 Ablehnung von Hypothese 3

Aufgrund der vorhergehenden Erkenntnisse kann die **Hypothese 3** aus Forschungsfrage 3.3 nicht bestätigt werden:

- ➔ Die zwischenzeitliche Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges führt zu keiner nachweisbaren Veränderung im Fahrerverhalten auf den darauffolgenden Fahrten im Elektrofahrzeug.



Insbesondere für den Einsatz von Elektrofahrzeugen im häufigen Mischbetrieb mit Verbrennerfahrzeugen, wie dies zum Beispiel im Car-Sharing oder in der Firmenflotte der Fall ist, bedeutet dies, dass der sichere Umgang mit dem Elektrofahrzeug nicht durch die zwischenzeitliche Nutzung eines Verbrennerfahrzeuges gefährdet wird. Dabei ist in diesem Zusammenhang hervorzuheben, dass insbesondere das Erlernen der Ein-Pedal-Fahrweise, sobald einmal verinnerlicht, nicht wieder neu erlernt werden muss. Auch zeigt sich bezüglich der Energieeffizienz des Fahrerverhaltens keinerlei nachteilhafter Einfluss durch das Fahren eines Verbrennerfahrzeuges.

5.5 Durch optimiertes Fahrerverhalten umsetzbares Einsparpotential

Abschließend ist die Frage nach dem prinzipiell erzielbaren Einsparpotential durch reichweitenoptimiertes Fahrerverhalten zu klären. Die Ergebnisse in den Kapiteln 5.2 bis 5.4 haben gezeigt, dass im alltäglichen Gebrauch weder im Probandendurchschnitt noch bei Berücksichtigung der individuellen Streckencharakteristiken ein genereller Lernprozess zur Erhöhung der Energieeffizienz des EVs zu beobachten ist. Dies schließt allerdings nicht aus, dass die erfahrenen Fahrzeuglenker über *das Wissen* und *das Können* verfügen um ihr EV effizient zu bewegen, aber dies allein auf Grund mangelnden Willens nicht umsetzen. Im Rahmen der Zwischenevaluation (vgl. Kapitel 4.3.2) nach etwa zweimonatiger Nutzung des EV wurde die Motivation gezielt vorgegeben, um das bei erfahrenen Fahrern vorhandene *Wissen* und *Können* zu überprüfen. Da das Versuchsfahrzeug MINI E über keinerlei Fahrerassistenzsysteme verfügt, ist jeder messbare Unterschied in der Effizienz der Fahrweise auf den Fahrer zurückzuführen.

5.5.1 Energieersparnis auf der gesamten Referenzstrecke

Auf der gesamten 31 km lange Referenzstrecke über Autobahn, Landstraße und Stadt konnten die Probanden durch effiziente Fahrweise ($M = 13,4$ kWh/100km; $SD = 2,0$ kWh/100km) im Durchschnitt den Verbrauch um 23% gegenüber der normalen Fahrweise ($M = 17,6$ kWh/100km; $SD = 2,1$ kWh/100km) senken, $t(40) = 10,189$; $p < 0,001$. Abbildung 5-21 verdeutlicht, dass es dabei nahezu allen Probanden gelang, auf der sparsamen Fahrt weniger Energie zu verbrauchen als auf der normalen Fahrt.

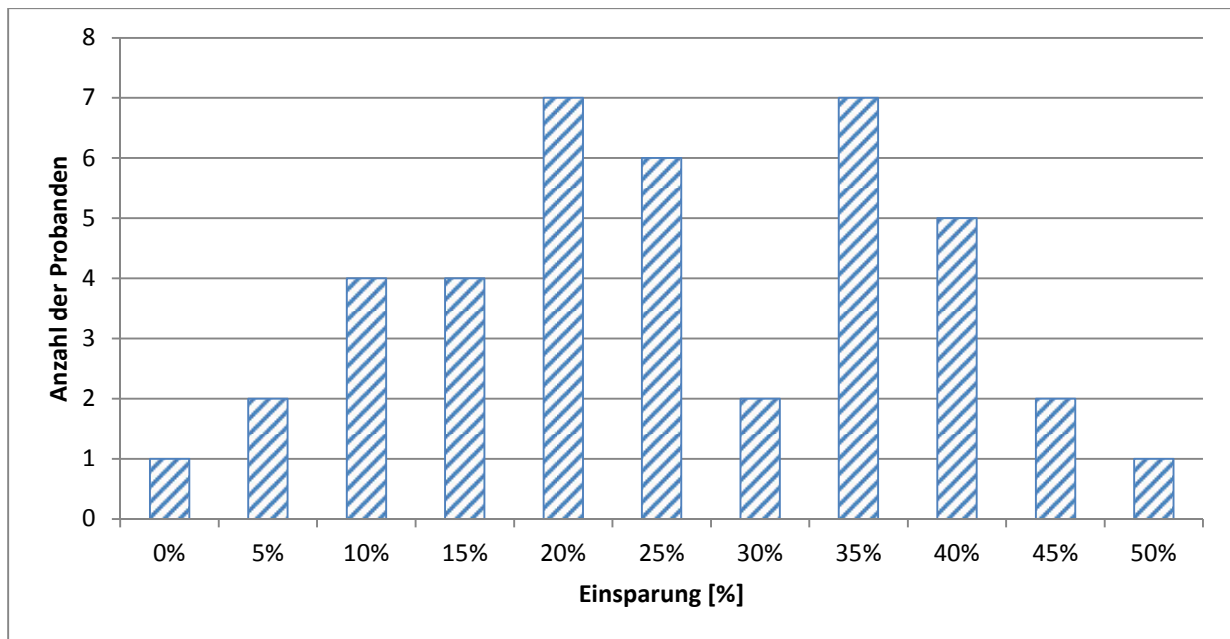


Abbildung 5-21: Verteilung der Einsparung von effizienter gegenüber normaler Fahrweise ($n = 41$; Referenzstrecke)

Der Vergleich der die Effizienz bestimmenden Fahrerhaltensgrößen zeigt nur für die 95. Perzentile der Verzögerung und den Anteil mechanischer Verzögerung keinen signifikanten Unterschied zwischen normaler und sparsamer Fahrweise (vgl. Tabelle 5.16). Alle anderen Metriken belegen, dass die Probanden bei Anweisung gezielt sparsam zu fahren ihr Fahrerhalten den Regeln für effizientes Fahren im Elektrofahrzeug anpassen. Es wird in allen Geschwindigkeitsbereichen weniger stark beschleunigt (siehe Anteil der Beschleunigung und 95. Perzentile der Beschleunigung in Tabelle 5.16) und insgesamt gleichmäßiger gefahren (vgl. Konstantfahrtanteil, mittlere Celeration sowie Variationskoeffizient und Standardabweichung der Beschleunigung in Tabelle 5.16).



Tabelle 5.16: Vergleich der energieeffizienzbestimmenden Metriken bei normalem und effizientem Fahrerverhalten ($n = 41$; Referenzstrecke)

| Metrik | Normales Fahrerverhalten | | Gezielt effizientes Fahrerverhalten | | t- Test | |
|--|--------------------------|------|-------------------------------------|------|---------|--------|
| | M | SD | M | SD | t(40) | p |
| Anteil mechanischer Verzögerung [%] | 0,13 | 0,13 | 0,07 | 0,07 | -1,65 | 0,107 |
| Anteil regenerativer Verzögerung [%] | 21,3 | 3,3 | 20,1 | 4,3 | 2,02 | 0,050 |
| Konstantfahrtanteil [%] | 58,2 | 5,4 | 70,1 | 4,9 | -13,16 | <0,001 |
| Anteil der Beschleunigung [%] | 20,3 | 2,6 | 15,6 | 2,6 | 11,03 | <0,001 |
| Variationskoeffizient der Beschleunigung [] | 1,36 | 0,20 | 1,06 | 0,14 | 11,24 | <0,001 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung 0 bis 40 km/h [m/s ²] | 2,24 | 0,37 | 1,82 | 0,26 | 6,99 | <0,001 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung 40 bis 60 km/h [m/s ²] | 2,23 | 0,46 | 1,74 | 0,32 | 6,25 | <0,001 |
| 95. Perzentil der Beschleunigung 60 bis 110 km/h [m/s ²] | 2,03 | 0,43 | 1,44 | 0,26 | 9,02 | <0,001 |
| 95. Perzentil der Verzögerung 0 bis 40 km/h [m/s ²] | -0,44 | 0,07 | -0,42 | 0,02 | -1,31 | 0,197 |
| 95. Perzentil der Verzögerung 40 bis 60 km/h [m/s ²] | -0,47 | 0,08 | -0,47 | 0,07 | 0,28 | 0,781 |
| 95. Perzentil der Verzögerung 60 bis 110 km/h [m/s ²] | -0,45 | 0,03 | -0,45 | 0,03 | -0,50 | 0,617 |
| Mittlere Celeration [m/s ²] | 0,42 | 0,06 | 0,30 | 0,04 | 12,98 | <0,001 |
| Standardabweichung der Beschleunigung [m/s ²] | 0,64 | 0,09 | 0,48 | 0,06 | 12,34 | <0,001 |

Zusammen mit der Kenntnis über die im Probandendurchschnitt auftretenden Lernvorgänge darf das Ergebnis so interpretiert werden, dass die Fahrer zum Zeitpunkt dieser Versuchsfahrt bereits den gezielten Umgang mit der Rekuperationsfunktion soweit verinnerlicht haben, dass in diesem Bereich kaum mehr Potential zur weiteren Optimierung vorhanden ist. Bezüglich aller anderen Metriken sind die Fahrer aber sehr wohl in der Lage bei entsprechender *Motivation* ausreichend *Wissen* und *Können* umzusetzen, um durch angepasstes Fahrerverhalten die Reichweite des EVs maßgeblich zu erhöhen.

5.5.2 Besonderheiten in den unterschiedlichen Streckenteilen

Bei gesonderter Betrachtung der einzelnen Streckenabschnitte sticht einzig der Teil „Innerstädtisch 60“ hervor, der sich streckencharakteristisch durch eine Vielzahl an ampelgeregelten Kreuzungen von den anderen Abschnitten abhebt. Nur in diesem Abschnitt gelang es den Probanden vergleichbar schlecht eine gleichmäßige und dadurch effiziente Fahrweise umzusetzen. Obwohl alle Metriken dieses



Ergebnis stützen (vollständige Auflistung siehe Anhang E), wird bei Betrachtung des Konstantfahranteils am deutlichsten, dass auf diesem Streckenabschnitt der Unterschied zwischen der gezielt effizienten Fahrweise und der normalen Fahrweise am geringsten ist (vgl. Tabelle 5.17).

Tabelle 5.17: Vergleich des Konstantfahranteils bei normaler und effizienter Fahrweise auf den einzelnen Abschnitten der Referenzstrecke ($n = 41$, Referenzstrecke)

| Streckenabschnitt der Referenzstrecke | Normal | | Sparsam | | Statistik <i>t</i> -Test | Signifikanz (2-seitig) |
|--|----------|-----------|----------|-----------|-----------------------------|---------------------------|
| | <i>M</i> | <i>SD</i> | <i>M</i> | <i>SD</i> | | |
| Autobahn | 62,5% | 8,9% | 77,5% | 7,2% | $t(40) = -9,315$ | $p < 0,001$ |
| Landstraße (1-spurig) | 63,1% | 7,5% | 78,3% | 6,4% | $t(40) = -12,336$ | $p < 0,001$ |
| Ausfallstraße (2-spurig) | 54,3% | 9,5% | 63,7% | 8,6% | $t(40) = -5,367$ | $p < 0,001$ |
| Innerstädtisch 60 km/h | 58,2% | 9,2% | 62,9% | 7,6% | $t(40) = -2,622$ | $p = 0,012$ |
| Innerstädtisch 30 km/h | 52,1% | 7,5% | 61,2% | 9,1% | $t(40) = -7,329$ | $p < 0,001$ |
| Gesamtstrecke | 58,2% | 5,4% | 70,1% | 4,9% | $t(40) = -13,159$ | $p < 0,001$ |

Ursache hierfür sind vermutlich die vielen ampelgeregelten Kreuzungen, die zu kaum vorhersehbaren Verzögerungsmanövern und somit zu einer höheren Oszillation des Geschwindigkeitsverlaufs führen. Wie auch Abbildung 5-22 zu erkennen ist dabei sogar im Streckenabschnitt mit Tempolimit von 30 km/h (*Innerstädtisch 30*) eine höhere Optimierung des Fahrerverhaltens hinsichtlich der Energieeffizienz nachweisbar.

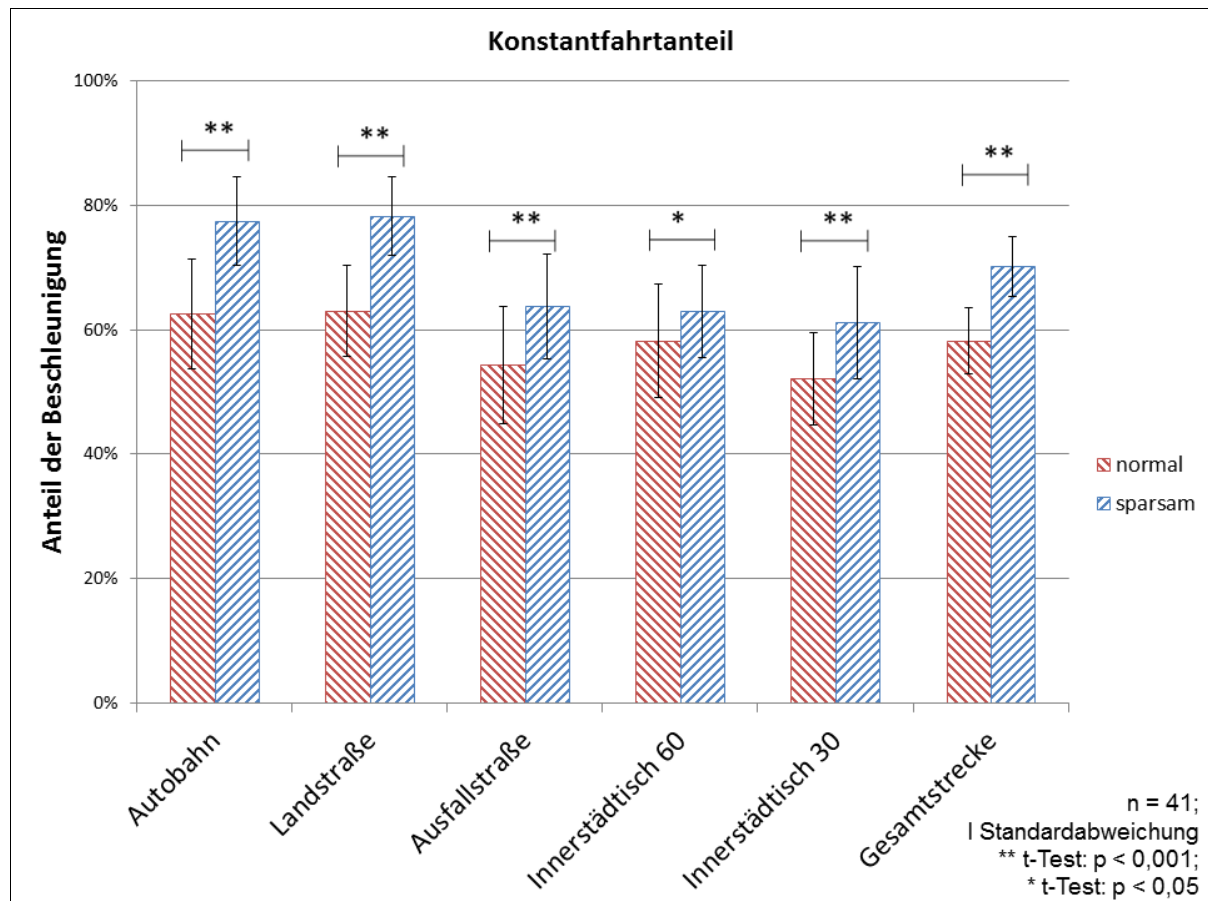


Abbildung 5-22: Konstantfahrtanteil bei normaler und sparsamer Fahrweise auf den einzelnen Abschnitten der Referenzstrecke (n = 41; Referenzstrecke)

Aus dieser Erkenntnis darf gefolgert werden, dass insbesondere in Verkehrsszenarien mit einer Vielzahl an Ampelkreuzungen unausgeschöpftes Potential zur Optimierung einer effizienten Fahrweise bestehen bleibt. Offensichtlich schränkt der schlecht vorhersehbare Zustand der Ampel die Fahrer in der Ausübung einer effizienten gleichmäßigen und vorausschauenden Fahrweise ein. Inwiefern dies durch Fahrerassistenzsysteme erreicht werden kann, bleibt zukünftiger Forschung überlassen.

5.5.3 Bestätigung von Hypothese 4

Die **Hypothese 4** aus Forschungsfrage 3.4 kann demnach bestätigt werden:

➔ Auf Anweisung können alle Probanden durch Anwendung effizienten Fahrerhaltens den Verbrauch des Elektrofahrzeuges signifikant senken und damit die Reichweite erhöhen.

Die Energieersparnis von durchschnittlich 23% wurde dabei von nahezu allen Probanden durch Anwendung der folgenden Fahrstrategien erreicht:

- Vermeidung von starker Beschleunigung, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten
- gleichmäßiges Fahren in allen Geschwindigkeitsbereichen



Die Probanden zeigen demnach das theoretisch optimale (vgl. Kapitel 2.1.2) Fahrerverhalten für eine energieeffiziente Fortbewegung im Elektrofahrzeug.

Da in den Versuchsfahrzeugen kein Geschwindigkeitshalteassist (Tempomat) verfügbar war, lässt sich folgern, dass die Implementierung der Rekuperationsfunktion im Fahrpedal nicht im Widerspruch zur Umsetzung einer effizienten Fahrweise mit hohem Konstantfahrtanteil steht. Das Fahrpedal zusammen mit der optischen Rückmeldung über den Leistungsfluss (vgl. Abbildung 4-2) ist ausreichend um das Fahrzeug gleichmäßig bei annähernd konstanter Geschwindigkeit zu bewegen. Eine Notwendigkeit den Übergang von Beschleunigen zu Rekuperieren zusätzlich mittels eines aktiven Fahrpedals haptisch zu signalisieren ist demnach nicht gegeben.

Vergleicht man auch die Werte der einzelnen Metriken in der normalen Fahrt, so liegen sie durchaus im repräsentativen Bereich des gesamten Feldversuchs. Das heißt, die Probanden sind in der normalen Fahrt nicht absichtlich sportlicher gefahren als auf ihren alltäglichen Fahrten. Dies wiederum bestätigt die Ergebnisse der Trendanalysen. Die Probanden könnten mit Ihrem EV deutlich sparsamer fahren, bevorzugen aber dennoch individuell mehr oder weniger sportliches Fahren und entwickeln sich dementsprechend in ihren individuellen Trends fort. Ein weiteres Indiz für die individuelle Präferenz des Fahrstils im alltäglichen Gebrauch des MINI E ist zudem die Tatsache, dass die erreichte Energieersparnis auf der Referenzstrecke unabhängig von der jeweiligen Fahrerfahrung im MINI E ist ($r_p(35) = 0,193$; $p = 0,275$). Zu erwähnen bleibt in diesem Zusammenhang auch, dass laut Befragung im Anschluss an die Versuchsfahrt die gezielt sparsame Fahrweise für 85% der Probanden nur als Notlösung akzeptabel ist und demnach keine Alternative für die Bewältigung alltäglicher Fahrten darstellt.



6 Zusammenfassende Diskussion und Fazit

Die Ergebnisse verschiedener Nutzerstudien (Cocron, 2014; Franke, 2014; Labeye et al., 2012; Neumann, 2015) ließen vermuten, dass die Fahrer von Elektrofahrzeugen ihr Fahrerverhalten mit zunehmender Fahrerfahrung immer weiter hinsichtlich der Effizienz optimieren, um die begrenzte Reichweite möglichst gut auszunutzen. Die Ergebnisse dieses Feldversuchs zeigen allerdings, dass sich für diese Vermutung im tatsächlichen Fahrerverhalten keine Beweise finden lassen.

Zwar konnte bestätigt werden,

1. dass der gezielte Einsatz der Rekuperationsfunktion innerhalb weniger Wiederholungen von Bremsmanövern erlernt wird.
2. dass nach zweimonatiger Fahrerfahrung im Elektrofahrzeug ausreichend Kompetenzen vorhanden sind um energieeffiziente Fahrstrategien erfolgreich anzuwenden.

Festgestellt wurde jedoch auch,

3. dass keine generellen Veränderungen im Fahrerverhalten stattfinden.
4. dass kein Zusammenhang zwischen individuellen Rahmenbedingungen und stattfindenden Veränderungen im Fahrerverhalten besteht.

Die Tatsache, dass die Probanden einerseits auf ihren individuellen täglichen Fahrten keine generelle Tendenz zu energieeffizientem Fahrerverhalten aufweisen, andererseits nach zweimonatiger Fahrerfahrung in der Lage sind, durch entsprechendes Fahrerverhalten über 20% effizienter zu fahren, belegt, dass allein die persönliche Motivation für die Ausprägung eines bestimmten Fahrstils entscheidend ist. Über die fünfmonatige Nutzungsdauer hinweg zeigten die Versuchsteilnehmer variantenreiche Fahrweisen ohne dabei der begrenzten Reichweite durch entsprechendes Fahrerverhalten gerecht werden zu müssen. Ab welchem Zeitpunkt effiziente Fahrstrategien, die nicht im alltäglichen Fahrerverhalten angewandt werden, Teil des individuellen *Wissens* und *Könnens* sind, kann im Rahmen dieses Versuches nicht abschließend geklärt werden. Laut Neumann (2015) ist eine grundlegende Kompetenz energieeffizient zu fahren bereits bei unerfahrenen Elektrofahrzeugnutzern vorhanden. Es ist also durchaus möglich, dass das energieeffiziente Fahren im Elektrofahrzeug zu einem gewissen Grad intuitiv ist. Vor dem Hintergrund des direkten Zusammenhangs von Energieverbrauch und Fahrwiderständen und der geringen Lastabhängigkeit des Wirkungsgrades im Elektrofahrzeug erscheint diese Vermutung plausibel, müsste aber noch in entsprechenden Probandenstudien belegt werden. Laut den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ist die im Feldversuch erzielte Energieersparnis unabhängig von der persönlichen Fahrerfahrung im Elektrofahrzeug. In Bezug zu den Erkenntnissen von Neumann et al. (2015) bedeutet dies, dass zwar mit der Fahrerfahrung das theoretische Wissen über die Beeinflussung der Reichweite durch das



Fahrerverhalten steigen mag, dies aber auf Grund mangelnder Motivation nicht auf alltäglichen Fahrten angewandt wird.

Der Zusammenhang von Rekuperation und Energieeffizienz ist dabei gesondert hervorzuheben. Sicherlich ist es effizienter die Rekuperationsfunktion zu nutzen als die mechanische Reibbremse zu betätigen. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass es nochmals effizienter ist, mit konstanter Geschwindigkeit zu fahren und dabei die Rekuperation so selten wie möglich zu aktivieren. Demnach entscheidet nicht allein der Anteil mechanischer Verzögerung über die Energieeffizienz des Fahrerverhaltens sondern der Gesamtsatz an Metriken, der im Rahmen dieser Arbeit definiert und angewandt wurde. Dabei konnte das sehr schnelle Erlernen der gezielten Rekuperation bestätigt werden, das auch schon von Cocron et al. (2013) anhand des Anteils mechanischer Bremsmanöver identifiziert wurde. Zu nennen sind diesbezüglich auch die Ergebnisse aus Helmbrecht et al. (2014) bezüglich der ersten und der fünf Monate später stattfindenden letzten Fahrt auf der Referenzstrecke des Feldversuchs. Das initiale Erlernen der Regelung der Rekuperation über das Loslassen des Fahrpedals wird im auffällig höheren Anteil an starker Verzögerung in der Initialfahrt als in der Abschlussevaluation deutlich. Es ist aber bereits im Vergleich dieser beiden Fahrten erkennbar, dass durch den zunächst ungeübten Umgang mit der Rekuperation das Fahren mit gleichmäßiger Geschwindigkeit und das Beschleunigen nicht maßgeblich beeinflusst werden. Es führt lediglich zu einer Verschiebung der Anteile von starker zu schwächerer Verzögerung im Bereich des regenerativen Bremsens. Dieser Lernvorgang ist innerhalb der ersten Fahrten abgeschlossen und beeinflusst damit das weitere Fahrerverhalten mit dem Elektrofahrzeug nicht.

Abschließend soll auf mögliche Limitationen der hier gewonnenen Ergebnisse eingegangen werden. Wie bei allen Feldversuchen üblich, unterliegen die Ergebnisse nicht kontrollierbaren Einflussgrößen. Diese wurden so gut wie möglich methodisch berücksichtigt, sind aber dennoch nicht völlig auszuschließen. Gerade die hohe Varianz in der im Elektrofahrzeug zurückgelegten Gesamtstrecke erschwert die statistische Auswertung, entspricht wohl aber den natürlichen Fahrprofilen der Fahrzeugnutzer und ist somit wiederum Voraussetzung für repräsentative Ergebnisse. Auch konnte in diesem Feldversuch nicht gezielt untersucht werden, ob Probanden bei Fahrten, die an die Grenze der Reichweite des Elektrofahrzeuges stoßen, ihr Fahrerverhalten gezielt an diese Umstände anpassen. Dazu ist die Datenbasis zu gering, da nur eine von mehr als 6.000 Fahrten deutlich über der angegebenen Reichweite des MINI E lag.

Fazit

Insgesamt belegen die Ergebnisse, dass das Elektrofahrzeug trotz seiner batterietechnischen und fahrdynamischen Rahmenbedingungen für unterschiedlichste Fahrer auf allen Strecken innerhalb der möglichen Reichweite und auch für den Einsatz im Mischbetrieb mit Verbrennerfahrzeugen geeignet



ist. Ein besonderes Fahrerverhalten muss dabei nicht erst erlernt werden und ist auch nicht notwendig um das Elektrofahrzeug erfolgreich zu nutzen. Vielmehr erlaubt ein leistungsstarkes Elektrofahrzeug allen Fahrern die Anwendung ihrer individuellen Fahrstilpräferenzen. Die aus der Nutzerforschung bekannten Lernprozesse gelten damit vielmehr für das Erlernen der richtigen Einschätzung der Reichweite, als für das Erlernen der Anwendung entsprechender Strategien zur Lösung eines möglichen Reichweitenkonflikts. Gerade deshalb ist es nötig, unerfahrenen Fahrern die richtige Einschätzung der Reichweite zu vermitteln. Dies muss entweder vor Nutzung des EVs durch den Aufbau von technischem Verständnis über die Batterie als Energiespeicher oder unmittelbar ab Fahrtbeginn durch eine vorhersehbare und zutreffende Reichweitenanzeige geschehen.

7 Ableitung von Gestaltungsempfehlungen

Die Ergebnisse des Feldversuchs haben gezeigt, dass die Nutzung eines Elektrofahrzeugs nicht dem Zwang einer optimiert sparsamen Fahrweise unterliegt. Dennoch scheinen sich auch zur heutigen Zeit noch die typischen Vorurteile über die eingeschränkte Nutzbarkeit von Elektrofahrzeugen zu halten. Diese sind allerdings nicht auf eine objektiv erforderliche Limitation des individuellen Fahrerverhaltens durch den E-Antrieb oder die Batterietechnologie zurückzuführen, sondern eher von psychologischen Barrieren durch die subjektiv empfundene Reichweite bedingt. Im Wesentlichen bleibt damit aus technischer Sicht nur noch eine Aufgabe zu lösen. Jedes Elektrofahrzeug benötigt eine jederzeit präzise Angabe der aktuell verfügbaren Restreichweite, um dem Fahrer eine belastbare Grundlage für die weitere Fahrtenplanung zu geben. Dadurch werden sämtliche aus der Nutzerbefragung bekannten Probleme zum Umgang mit der begrenzten Reichweite gelöst. Eine von Beginn an für jeden Fahrer verlässliche Reichweitenprädiktion macht es überflüssig, den Umgang mit der Reichweite mühsam durch lange Fahrerfahrung zu erlernen.

7.1 Auslegung der Antriebscharakteristik

Elektrofahrzeuge profitieren von ihrem überzeugenden Ansprechverhalten und der gleichmäßigen Drehmomententfaltung. Dies bietet nicht nur die nötige Voraussetzung für einen sportlich-dynamischen Fahrstil, sondern ermöglicht auch komfortables und effizientes Fahren. Vor diesem Hintergrund wäre es sicherlich die falsche Entscheidung, zu Gunsten der theoretisch verfügbaren Reichweite auf eine leistungsstarke E-Maschine im Antriebsstrang zu verzichten. Nur wenn ein Elektrofahrzeug über ein ansprechendes fahrdynamisches Potential verfügt, ist es zum derzeitigen Stand der Technik ein überzeugender Konkurrent zu konventionellen Fahrzeugen. Die Reichweitenproblematik wird nicht durch prinzipiellen Verzicht auf Performanz gelöst. Denn wie die hier gezeigten Ergebnisse belegen, können auch durchschnittliche Fahrer, stark motorisierte Elektrofahrzeuge bei Bedarf sehr effizient bewegen um das Ziel zu erreichen. Hier wird besonders deutlich, dass die E-Maschine im Gegensatz zur Verbrennungsmaschine auch bei Teillast verhältnismäßig effizient



betrieben werden kann, weshalb es umso entscheidender ist das noch bestehende Optimierungspotential im Antriebsstrang auszunutzen. Maßnahmen wie das Downsizing bieten für das Elektrofahrzeug demnach bei Weitem nicht dasselbe Potential wie im Verbrennerfahrzeug. Dem Fahrer eines Elektrofahrzeuges sollte daher jederzeit die nötige Freiheit eingeräumt werden über die Ausprägung seines Fahrstils selbst zu entscheiden. Das bedeutet nicht, dass das fahrdynamische Potential permanent von allen Fahrern ausgenutzt wird. Falls aber die Möglichkeit nach Belieben auch jederzeit besonders sportlich fahren zu können auf Grund einer minimalistischen Motorisierung nicht gegeben ist, verliert das Elektrofahrzeug an Attraktivität. Bei den derzeitigen Anschaffungskosten kann dies die Kaufentscheidung maßgeblich beeinflussen.

7.2 Interaktionskonzepte und Assistenzsysteme

Der Reichweitenkonflikt im Elektrofahrzeug ist nur durch eine optimale Restreichweitenprädiktion lösbar. Die Fahrer können die Ruhe des Antriebs ebenso wie sein sportliches Potential nur genießen, wenn sie jederzeit eine belastbare Angabe über die noch zur Verfügung stehende Reichweite haben. Um dies zu ermöglichen, muss auf weit mehr Quellen zurückgegriffen werden als den Durchschnittsverbrauch während der letzten Minuten der aktuellen Fahrt. Wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt wurde, kann der individuelle Fahrstil den Energieverbrauch des Elektrofahrzeuges bis zu 50% verringern. Eine persönliche, streckenabhängige Fahrstilpräferenz muss demnach ebenso berücksichtigt werden wie die aktuellen Verkehrsbedingungen, das noch zu absolvierende Routenprofil und weitere variable Umgebungsbedingungen wie etwa die Umgebungstemperaturen. Die Sammlung und Auswertung von persönlichen Fahrstilhistorien bietet dabei den optimalen Ansatzpunkt für den auf einer bestimmten Strecke zu einer bestimmten Uhrzeit zu erwartenden Energieverbrauch und für das individuelle Optimierungspotential einer gezielt effizienten Fahrweise.

Die hier präsentierten Ergebnisse bestätigen, dass trotz Integration der Rekuperation in das Fahrpedal effiziente Fahrstrategien mit hohem Anteil an gleichmäßigem Fahren anwendbar sind. Allein durch optische Rückmeldung des aktuellen Leistungsflusses kann der Betriebspunkt, bei dem das Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit fährt, erreicht und gehalten werden. Das Ein-Pedal-Bedienkonzept ist somit als eine ideale Möglichkeit zur Regelung der Längsdynamik im Elektrofahrzeug zu sehen. Gerade auch in Vorbereitung auf die Einführung automatisierter Fahrfunktionen sollten dabei auch Alternativen zum Bremspedal in Betracht gezogen werden, die die Aktivierung der mechanischen Reibbremse als reine Notfunktion unterstützen.

Bezüglich der Implementierung von Fahrerassistenzsystemen konnten Verkehrssituationen mit Ampelzufahrten als Szenario mit möglichem Potential zur Verbrauchsoptimierung identifiziert werden. Inwiefern andere Assistenzsysteme zum energieeffizienten Fahren zielführend sein können, bleibt zu untersuchen. Bei der Abschätzung des möglichen Energiesparpotentials sollte aber bedacht



werden, dass bereits ohne Fahrerassistenzsysteme eine Einsparung von über 20% durch einen optimierten Fahrstil erreicht werden kann. Eine Veränderung der Pedalkennlinie um starkes Beschleunigen zu unterdrücken sollte demnach auch nur als Option für den Notfall gewählt werden, aber nicht genereller Bestandteil einer reichweitenoptimierten Fahrzeugkonfiguration sein.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass selbst bei begrenzter Reichweite und erschwelter Nachladeprozedur mit dem Elektrofahrzeug das gesamte Spektrum möglicher Fahrstile gewählt wurde. Eine effizienzoptimierte Fahrweise ist dabei zwar als Notlösung aber nicht im alltäglichen Betrieb akzeptabel. Gerade vor diesem Hintergrund sollte zur Optimierung der Effizienz nicht allein beim Fahrer angesetzt werden, sondern in erster Linie auf fahrzeugtechnischer Seite durch Reduzierung von Verlusten insbesondere bei der Rückspeisung von Bremsenergie.



8 Literaturverzeichnis

- AC Propulsion. (2013). *AC-150 Gen-2 EV Power System*. Zugriff am 01.09.2016. Verfügbar unter <http://www.acpropulsion.com/datasheet/ac150gen2.pdf>.
- Adornato, B., Patil, R., Filipi, Z., Baraket, Z. & Gordon, T. (2009). Characterizing Naturalistic Driving Patterns for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Analysis. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 655-660.
- af Wählberg, A. E. (2006). Driver Celeration Behavior and the Prediction of Traffic Accidents. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, 12 (3).
- af Wählberg, A. E. (2007). Long-term effects of training in economical driving: Fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37 (4), 333-343.
- Akamatsu, M. (2002). Measuring driving behavior. *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. IEEE*, 798-803.
- Alessandrini, A. & Orecchini, F. (2003). A driving cycle for electrically-driven vehicles in Rome. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217 (9), 781-789.
- Alessandrini, A., Orecchini, F., Ortenzi, F. & Villatico Campbell, F. (2009). Drive-style emissions testing on the latest two Honda hybrid technologies. *Eur. Transp. Res. Rev.*, 1 (2), 57-66.
- Alvarez, R., Lopez, A. & De la Torre, N. (2014). Evaluating the effect of a driver's behaviour on the range of a battery electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*.
- Anderson, J., Fincham, J. & Douglass, S. (1999). Practice and retention: A unifying analysis. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25 (5), 1120-1136.
- André, M. (1997). Driving patterns analysis and driving cycles, within the project: European Development of Hybrid Technology approaching efficient Zero Emission Mobility (HYZEM). *INRETS report N° LEN 9709, Bron, France*, 47 pp.
- André, M. (2004). The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *The Science of the total environment*, 73-84.
- André, M. & Rapone, M. (2009). Analysis and modelling of the pollutant emissions from European cars regarding the driving characteristics and test cycles. *Atmospheric Environment*, 43 (5), 986-995.



- Bald, S. (1987). *Untersuchungen zu Determinanten der Geschwindigkeitswahl: Bericht 1: Auswertung von Geschwindigkeitsprofilen auf Ausserortsstrassen*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Bär, T., Aidel, J. & Zöllner, J. M. (Hrsg.). (2012). *Szenenbasierte Fahrstilerkennung durch probabilistische Auswertung von Fahrzeugdaten*. Karlsruhe: FZI Forschungszentrum Informatik.
- Beusen, B., Broekx, S., Denys, T., Beckx, C., Degraeuwe, B., Gijsbers, M. et al. (2009). Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14 (7), 514-520.
- Boriboonsomsin, K., Vu, A. & Barth, M. (2010). Eco-Driving: Pilot Evaluation of Driving Behavior Changes Among U.S. Drivers. *Faculty Research, University of California TRansportation Center*. Verfügbar unter <http://escholarship.org/uc/item/9z18z7xg>.
- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (Hrsg.). (2013). *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (7., aktualisierte Auflage). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Bratt, H. & Ericsson, E. (2000a). *Measuring vehicle driving patterns - estimating the influence of different measuring intervals*, Lund Institute of Technology. Lund
- Bratt, H. & Ericsson, E. (2000b). Measuring vehicle driving patterns – estimating the influence of different measuring intervals. In Lund Institute of Technology (Hrsg.), *Urban Transport Systems. Proceedings from the 2nd KFB Research Conference in Lund, Sweden, 7 – 8 June, 1999* (S. 9–20)
- Brettner, S. (2015). *Möglichkeiten einer Fahrstilerkennung durch die Frequenzanalyse quer- und längsdynamischer Fahrparameter*. unveröffentlichte Studienarbeit, Technische Universität München. München
- Brettner, S., Fleischmann, J. & Off, M. (2013). *Das längsdynamische Fahrverhalten mit Elektrofahrzeugen*. unveröffentlichte Studienarbeit, Technische Universität München. München
- Brown, S., Heathcote, A. (2003). Averaging learning curves across and within participants. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35 (1), 11-21.
- Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E. & Vollrath, M. (Hrsg.). (2015). *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Cocron, P. (2014, 28. Mai). *Regenerative braking and low vehicle noise of electric vehicles - implications for the driver*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz. Chemnitz
- Cocron, P., Bühler, F., Franke, T., Neumann, I., Dielmann, B. & Krems, J. F. (2013). Energy recapture through deceleration - regenerative braking in electric vehicles from a user perspective. *Ergonomics*, 56 (8), 1203-1215.



- Dai, F., Zhang, J.-W. & Lu, T.-L. (2012). Modelling and recognition of a driver's starting intentions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 226 (5), 623-633.
- Dardanelli, A., Tanelli, M., Picasso, B., Savaresi, S. M., Tanna, O. & Santucci, M. D. (2012). A Smartphone-in-the-Loop Active State-of-Charge Manager for Electric Vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 17 (3), 454-463.
- Deml, B., Freyer, J. & Färber, B. (2007). Ein Beitrag zur Prädiktion des Fahrstils. In VDI Wissensforum (Hrsg.), *VDI Berichte. Fahrer im 21. Jahrhundert* (Human Machine Interface, Bd. 2015). Düsseldorf: VDI Verlag.
- Donges, E. (1982). Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 27, 183-190.
- Dorrer, C. (2003). *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Information*. Dissertation, Universität Stuttgart. Stuttgart
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das Gedächtnis. Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*. Leipzig: Duncker & Humblot.
- Eckl, T. (2015). *Quantifizierung von zeitlichen Variationen im Fahrerverhalten*. unveröffentlichte Studienarbeit, Technische Universität München. München
- Egbue, O. & Long, S. (2012). Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy Policy*, 48, 717-729.
- Ericsson, E. (2000). Driving pattern in urban areas - descriptive analysis and initial prediction model. *Bulletin 185, Lunds Universitet*.
- Ericsson, E. (2001). Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6 (5), 325-345.
- Fan, J. & Gijbels, I. (1996). *Local polynomial modelling and its applications*: Chapman and Hall.
- Fastenmeier, W. (1995a). *Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Strassenverkehrssysteme* (Mensch, Fahrzeug, Umwelt, Bd. 33). Köln, Bonn: Verlag TÜV Rheinland; Deutscher Psychologen-Verlag.
- Fastenmeier, W. (1995b). Situationsspezifisches Fahrverhalten und Informationsbedarf verschiedener Fahrergruppen. *Mensch Fahrzeug Umwelt*, 33.
- Feldstead, T., McDonald, M., Thorpe, N. & Fairchild, R. (2011). Foot-Lite enable safe & green driving (Public Report): D4.2D - Field Trials, plans, results and outcomes.



- Field, A. P. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics: And sex and drugs and rock 'n' roll* (4th edition).
- Fitts, P. M. & Posner, M. I. (1967). *Human Performance*. Belmont, CA: Brooks Cole.
- FOT-Net. (2014). *FESTA Handbook: Version 5*. Verfügbar unter [http://wiki.fot-net.eu/index.php/FESTA_Handbook/_Naturalistic_Driving_Study_\(NDS\)%3F](http://wiki.fot-net.eu/index.php/FESTA_Handbook/_Naturalistic_Driving_Study_(NDS)%3F).
- Franke, T. (2014). *Nachhaltige Mobilität mit begrenzten Ressourcen: Erleben und Verhalten im Umgang mit der Reichweite von Elektrofahrzeugen: Sustainable mobility with limited resources: Experience and behavior in dealing with electric vehicle range*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz. Chemnitz. Verfügbar unter http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/13350/Dissertation_Thomas_Franke.pdf.
- Franke, T., Cocron, P., Bühler, F., Neumann, I. & Krems, J. F. (2012a). Adapting to the range of an electric vehicle: The relation of experience to subjectively available mobility resources. In P. Valero Mora, J. F. Pace & L. Mendoza (Hrsg.), *Proceedings of the European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems* (S. 95–103). Lyon: Humanist Publications.
- Franke, T. & Krems, J. F. (2013). Interacting with limited mobility resources: Psychological range levels in electric vehicle use. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 48, 109-122.
- Franke, T., Neumann, I., Bühler, F., Cocron, P. & Krems, J. F. (2012b). Experiencing range in an electric vehicle: Understanding psychological barriers. *Applied Psychology*, 61 (3), 386-391.
- González, A. B., Wilby, M. R., Vinagre Diaz, Juan Jose & Sanchez Avila, C. (2014). Modeling and Detecting Aggressiveness From Driving Signals. *IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, 15 (4), 1419-1428.
- Hackenberg, U. & Heißing, B. (1982). Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. *ATZ*, 1982 (84), 341-345.
- Hajiamiri, S. & Wachs, M. (2010). Hybrid Electric Vehicles and Implications for Transportation Finance. *Public Works Management & Policy*, 15 (2), 121-135.
- Heathcote, A., Brown, S. & Mewhort, D. (2000). The power law repealed: The case for an exponential law of practice. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7 (2), 185-207.
- Helmbrecht, M., Olaverri-Monreal, C., Bengler, K. & Vilimek, R., Keinath, A. (2014). How Electric Vehicles Affect Driving Behavioral Patterns. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. Special Issue on Electro-Mobility*, 22-32.



- Hjälmdahl, M., Almqvist, S. & Várhelyi, A. (2002). Speed regulation by in-car active accelerator pedal - effects on speed and speed distribution. *IATSS Research*, 26 (2).
- Jürgensohn, T. (2001). *Kraftfahrzeugführung*. Berlin: Springer.
- Krems, J. F., Franke, T., Neumann, I. & Cocron, P. (2010). Research methods to assess the acceptance of EVs - experiences from an EV user study. In T. Gessner (Hrsg.), *Smart systems integration 2010*. Berlin, Offenbach: VDE-Verl.
- Labeye, E., Adrian, J., Hugot, M., Regan, M. A. & Brusque, C. (2013). Daily use of an electric vehicle: Behavioral changes and potential for ITS support. *IET Intelligent Transport Systems*, 7(2), 210-214.
- Labeye, E., Hugot, M., Regan, M. A. & Brusque, C. (2012). Electric Vehicles: An eco-friendly mode of transport which induce changes in driving behaviour. In De Waard, N., Merat, H., Jamson, Y., Barnard & O. Carsten (Hrsg.), *Human factors of systems and technology* (S. 171–180). Maastricht, Netherlands: Shaker.
- Langari, R. & Won, J.-S. (2005). Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle— Part I: System Architecture and Design of the Driving Situation Identification Process. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 54 (3), 925-934.
- Lee, Y.-C. & Hsu, W.-H. The study of EV data collection and analysis based on Taiwan i-EV pilot project. *World Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, 27, 1-7.
- Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München. (2015). *FTM Mobiletrack*, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München. Zugriff am 02.03.2015. Verfügbar unter <http://mobiletrack.ftm.mw.tum.de/index.php>.
- Li, S. E. & Peng, H. (2012). Strategies to minimize the fuel consumption of passenger cars during car-following scenarios. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 226 (3), 419-429.
- Marienfeld, H. (1970). Modelle für den "Regler Mensch" - ein Praktikumsversuch. In W. Oppelt & G. Vossius (Hrsg.), *Der Mensch als Regler* (S. 19–42). Berlin: VEB Verlag Technik.
- Merz, F. (1981). Intelligenz und Lernen. In H. Schmidtke (Hrsg.), *Lehrbuch der Ergonomie*. 2. bearbeitete und ergänzte Auflage (S. 74–88). München: Hanser.
- Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? In L. Evans & R. C. Schwing (Hrsg.), *Human Behavior and Traffic Safety* (S. 485–524). Boston, MA: Springer US.
- Mitrovic, D. (2005). Reliable Method for Driving Events Recognition. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6 (2), 198-205.



- Mitschke, M. & Chen, Z. (1991). Der Fahrer als adaptiver Regler. *VDA (FAT Schriftenreihe)*, 91
- Mitschke, M. & Wallentowitz, H. (2014). *Dynamik der Kraftfahrzeuge* (VDI-Buch, 5., überarb. u. erg. Aufl. 2014). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Murphey, Y. L., Milton, R. & Kiliaris, L. Driver's style classification using jerk analysis. *IEEE Workshop on Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems*, 23-28.
- Neumann, I. (2015). *Energieeffizienz im Elektrofahrzeug - Implikationen für die Nutzerschnittstelle, die Fahraufgabe und motivationale Aspekte*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz. Chemnitz
- Neumann, I., Franke, T., Cocron, P., Bühler, F. & Krems, J. F. (2015). Eco-Driving Strategies in Battery Electric Vehicle Use - How do Drivers Adapt over Time? *IET Intelligent Transport Systems*, 9 (7), 746-753.
- Newell, A. & Rosenbloom, P. S. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. In J. R. Anderson (Hrsg.), *Cognitive skills and their acquisition* (S. 1-55). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Quimby, A., Maycock, G., Palmer, C. & Buttress, S. (1999). *The factors that influence a driver's choice of speed — a questionnaire study: Prepared for Road Safety Division, Department of the Environment, Transport and the Regions* (Published project report TRL, Bd. 325). Wokingham: Transport Research Laboratory.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-13* (3), 257-266.
- Rauh, N., Franke, T. & Krems, J. F. (2015). Understanding the Impact of Electric Vehicle Driving Experience on Range Anxiety. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57 (1), 177-187.
- Redsell, M., Lucas, G. G. & Ashford, N. J. (1993). Factors affecting car fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 207 (14), 1-22.
- Roenitz, R., Braess, H. & Zomotor, A. (1977). Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen: Stand und Problematik Teil 1/2. *Automobil-Industrie* (1).
- Rommerskirchen, C. P., Helmbrecht, M. & Bengler, K. J. (2014). The Impact of an Anticipatory Eco-Driver Assistant System in Different Complex Driving Situations on the Driver Behavior. *IEEE Intelligent Transportation System Magazine*, 6 (2), 45-56.



- Ruwenstroth, G., Kuller, E. C. & Radder, F. (1989). *Situationsangemessene Geschwindigkeitswahl auf Außerortsstraßen* (Untersuchungen zu Determinanten der Geschwindigkeitswahl : Forschungsprojekt 8525 / Bereich Unfallforschung, Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach, Bd. 3). Bergisch Gladbach
- Shan, M., Worrall, S. & Nebot, E. (2013). Probabilistic Long-Term Vehicle Motion Prediction and Tracking in Large Environments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14 (2), 539-552.
- Shi, Q., Qiu, D., Wang, N. & Wang, R. (2011). The impact analysis of the accuracy of driving cycle based on divisions of running statuses, *International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, Wuhan, China.
- Sjödin, Å. & Lenner, M. (1995). On-road measurements of single vehicle pollutant emissions, speed and acceleration for large fleets of vehicles in different traffic environments. *Science of The Total Environment*, 169 (1-3), 157-165.
- Stevens, A., Brusque, C. & Krems, J. F. (Hrsg.). (2014). *Driver adaptation to information and assistance systems*. London: The Institution of Engineering and Technology.
- Tober, W. & Lenz, H.-P. (2016). *Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor: Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte* (Praxisberichte ÖVK). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Turrentine, T. S., Garas, D., Lentz, A. & Woodjack, J. (2011). *The UC Davis MINI E consumer study: Research Report UCD-ITS-RR-11-05*. Forschungsbericht, University of California. Davis. Verfügbar unter http://publications.its.ucdavis.edu/publication_detail.php?id=1470.
- Viti, F., Hoogendoorn, S. P., van Zuylen, H. J., Wilmink, I. R. & van Arem, B. (2008). Speed and acceleration distributions at a traffic signal analyzed from microscopic real and simulated data. *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Beijing, China.
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A. & Olschewski, I. (2010). *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen* (ATZ-MTZ-Fachbuch, 1. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Walsh, C., Carroll, S., Eastlake, A. & Blythe, P. (2010). *Electric Vehicle Driving Style and Duty Variation Performance Study*. Verfügbar unter <http://www.cenex.co.uk/wp-content/uploads/2013/06/Electric-vehicle-driver-and-duty-variation-performance-study1.pdf>.



-
- Wege, C. A., Pereira, M., Victor, T. W. & Krems, J. F. (2014). Behavioural adaptation in response to driving assistance technologies: A literature review. In A. Stevens, C. Brusque & J. F. Krems (Hrsg.), *Driver adaptation to information and assistance systems* (S. 13–34). London: The Institution of Engineering and Technology.
- Wickens, C. D., Gordon, S. E. & Liu, Y. (Hrsg.). (2004). *An introduction to human factors engineering*. Upper Saddle River NJ: Pearson Prentice Hall.
- Woodjack, J., Garas, D., Lentz, A., Turrentine, T. S., Tal, G. & Nicholas, M. (2012). Consumers' perceptions and use of electric vehicle range changes over time through a lifestyle learning process. *Proceedings of the 91st TRB Annual Meeting of Transportation Research Board*.



Formelzeichen

| | |
|--------------|---|
| v | <i>Geschwindigkeit</i> |
| a | <i>Beschleunigung</i> |
| j | <i>Ruck (erste zeitliche Ableitung der Beschleunigung)</i> |
| F_{roll} | <i>Rollwiderstand</i> |
| F_{luft} | <i>Luftwiderstand</i> |
| F_{besch} | <i>Beschleunigungswiderstand</i> |
| F_{steig} | <i>Steigungswiderstand</i> |
| m | <i>Fahrzeugmasse</i> |
| g | <i>Ortskonstante</i> |
| f_{roll} | <i>Rollwiderstandsbeiwert</i> |
| α | <i>Steigungswinkel</i> |
| ρ | <i>Dichte der Luft</i> |
| η | <i>Wirkungsgrad</i> |
| c_w | <i>Luftwiderstandsbeiwert</i> |
| A | <i>Stirnfläche</i> |
| e_i | <i>reduzierte Massenträgheiten des Gesamtfahrzeugs</i> |
| n_{min} | <i>minimal mögliche Betriebsdrehzahl (Verbrennungsmotor)</i> |
| n_{max} | <i>maximal mögliche Betriebsdrehzahl</i> |
| $n_{M,max}$ | <i>Drehzahl bei der das maximale Motormoment anliegt</i> |
| $n_{P,max}$ | <i>Drehzahl bei der die maximale Leistung anliegt</i> |
| n_{eck} | <i>Eckdrehzahl am Übergang von Ankerstellbereich zum Feldschwächebereich (Elektromotor)</i> |
| N | <i>Anzahl (Wiederholungsanzahl)</i> |
| B, b, c, k | <i>Parameter bei der Erzeugung von Näherungskurven</i> |
| T | <i>Bearbeitungszeit</i> |



| | |
|------------|---|
| $VarC$ | <i>Variationskoeffizient</i> |
| MW | <i>Mittelwert</i> |
| SD | <i>Standardabweichung</i> |
| MED | <i>Median</i> |
| poa_i | <i>Zeitanteil der Beschleunigung in einer Klasse i</i> |
| poj_i | <i>Zeitanteil des Rucks in einer Klasse i</i> |
| $ a _m$ | mittlere Celeration |
| a^+_m | mittlere positive Beschleunigung |
| a^-_m | mittlere Verzögerung |
| v_m | mittlere Geschwindigkeit |
| a_{max-} | maximale Verzögerung |
| a_{mac+} | maximale (positive) Beschleunigung |
| a_{med-} | Median der Verzögerung |
| a_{med+} | Median der positiven Beschleunigung |
| a_{sd} | Standardabweichung der (positiven und negativen) Beschleunigung |
| a_{sd-} | Standardabweichung der Verzögerung |
| a_{sd+} | Standardabweichung der positiven Beschleunigung |



Anhang A - Berechnung der Metriken

1 Streckenbezogene Metriken

1.1. Zeitanteile der Beschleunigung in den Klassen [m/s²]:

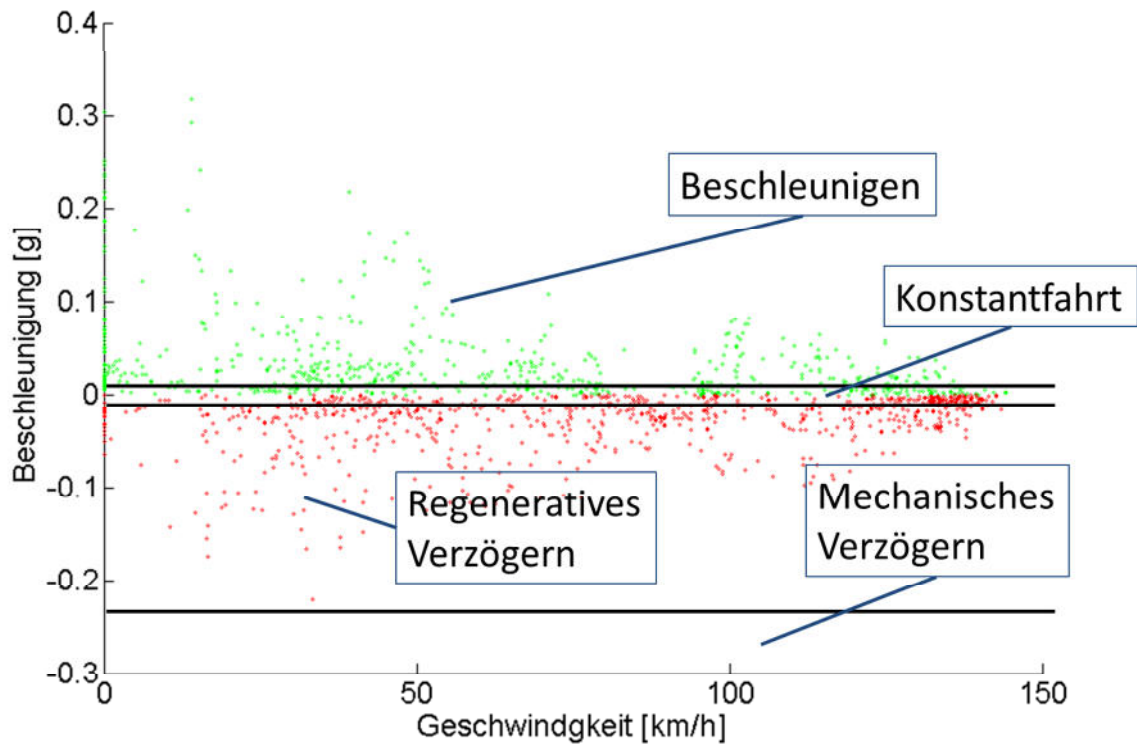
Nach Einteilung der gemessenen Beschleunigungswerte in die Klassen

| Metrik | Wertebereich |
|------------------------------------|--|
| - Anteil mechanischer Verzögerung | $a \leq - 2,3 \text{ m/s}^2$ |
| - Anteil regenerativer Verzögerung | $- 2,3 \text{ m/s}^2 < a \leq - 0,4 \text{ m/s}^2$ |
| - Konstantfahrt | $- 0,4 \text{ m/s}^2 < a \leq 0,4 \text{ m/s}^2$ |
| - Anteil der Beschleunigung | $a > 0,4 \text{ m/s}^2$ |

wird jeweils der Quotient

$$poa_i = \frac{N(\text{Beschleunigungswerte}_i)}{N(\text{Beschleunigungswerte})}$$

gebildet. Dieser entspricht aufgrund der konstanten Aufzeichnungsrate dem jeweiligen Zeitanteil der Beschleunigung in der entsprechenden Klasse.



1.2. Zeitanteile der Beschleunigung in den Klassen mit 1 m/s² Klassenbreite

Nach Einteilung der gemessenen Beschleunigungswerte in die Klassen

| | | | | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| < - 5 | > - 5 | > - 4 | > - 3 | > - 2 | > - 1 | > 0,5 | > 1,5 | > 2,5 |
| | < - 4 | < - 3 | < - 2 | < - 1 | < - 0,4 | < 1,5 | < 2,5 | |
| m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² |

wird jeweils der Quotient

$$poa_i = \frac{N(\text{Beschleunigungswerte}_i)}{N(\text{Beschleunigungswerte})}$$

gebildet. Dieser entspricht aufgrund der konstanten Aufzeichnungsrate dem jeweiligen Zeitanteil der Beschleunigung in der jeweiligen Klasse.

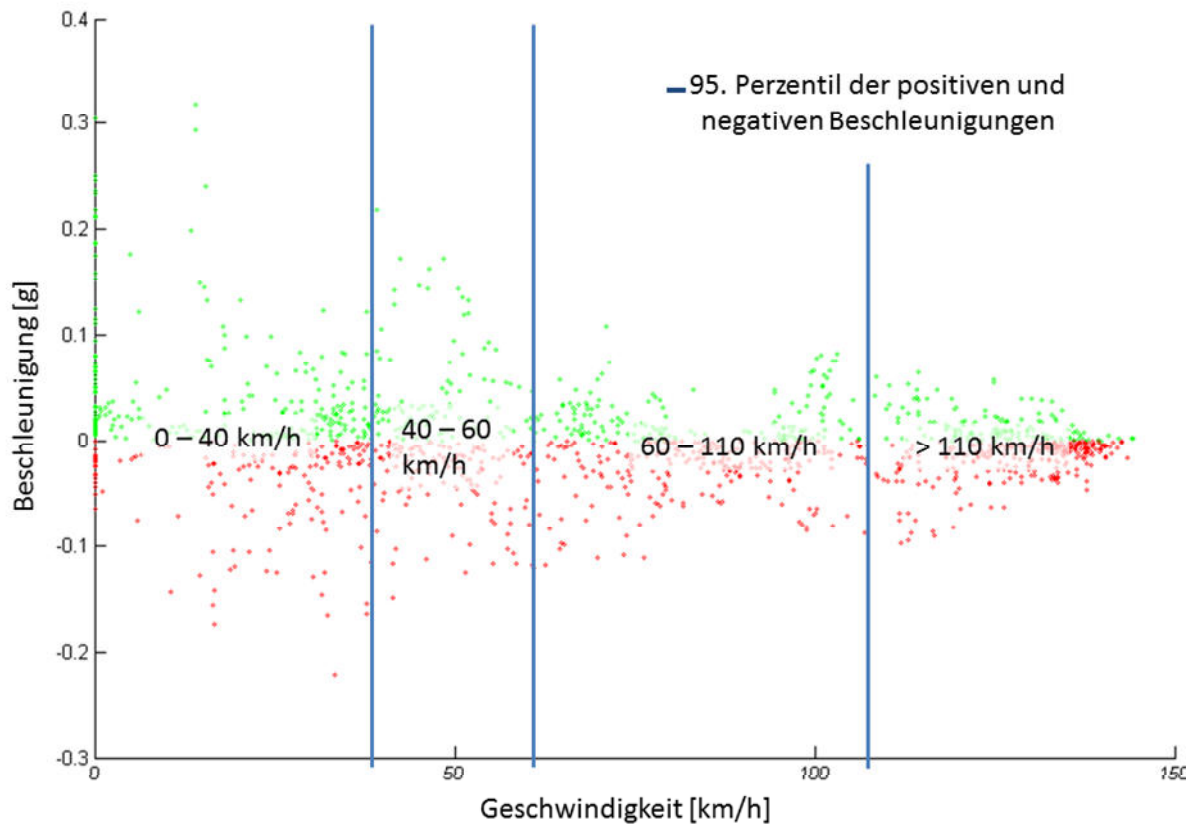
1.3. Variationskoeffizient:

$$VarC = \frac{SD(|a|)}{MW(|a|)}$$



1.4. 95. Perzentil der positiven und negativen Beschleunigungen in den vier Geschwindigkeitsklassen

Für die vier Geschwindigkeitsbereiche 0-40 km/h, 40-60 km/h, 60-110 km/h und >110 km/h wird jeweils für die positive und die negative Beschleunigung der 95. Perzentilwert berechnet.



1.5. Mittlere Celeration

$$|a|_m = MW(|a|)$$

1.6. Standardabweichung der Beschleunigung

$$a_{sd} = SD(a)$$

1.7. Mittlere Beschleunigung

$$a^+_m = MW(a > 0,4 \text{ m/s}^2)$$

1.8. Mittlere Verzögerung

$$a^-_m = MW(a < -0,4 \text{ m/s}^2)$$



1.9. Mittlere Geschwindigkeit

$$v_m = MW(v)$$

1.10. Zeitanteil des Rucks in den Klassen

Nach Einteilung der durch Derivation der Beschleunigungswerte erzeugten Ruckwerte in die Klassen

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| < - 9,5 | > - 9,5 | > - 8,5 | > - 7,5 | > - 6,5 | > - 5,5 | > - 4,5 | > - 3,5 | > - 2,5 | > - 1,5 | > - 0,5 | > 0,5 | > 1,5 | > 2,5 | > 3,5 |
| < - 8,5 | < - 7,5 | < - 6,5 | < - 5,5 | < - 4,5 | < - 3,5 | < - 2,5 | < - 1,5 | < - 0,5 | < 0,5 | < 1,5 | < 2,5 | < 3,5 | | |
| m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ | m/s ³ |

wird jeweils der Quotient

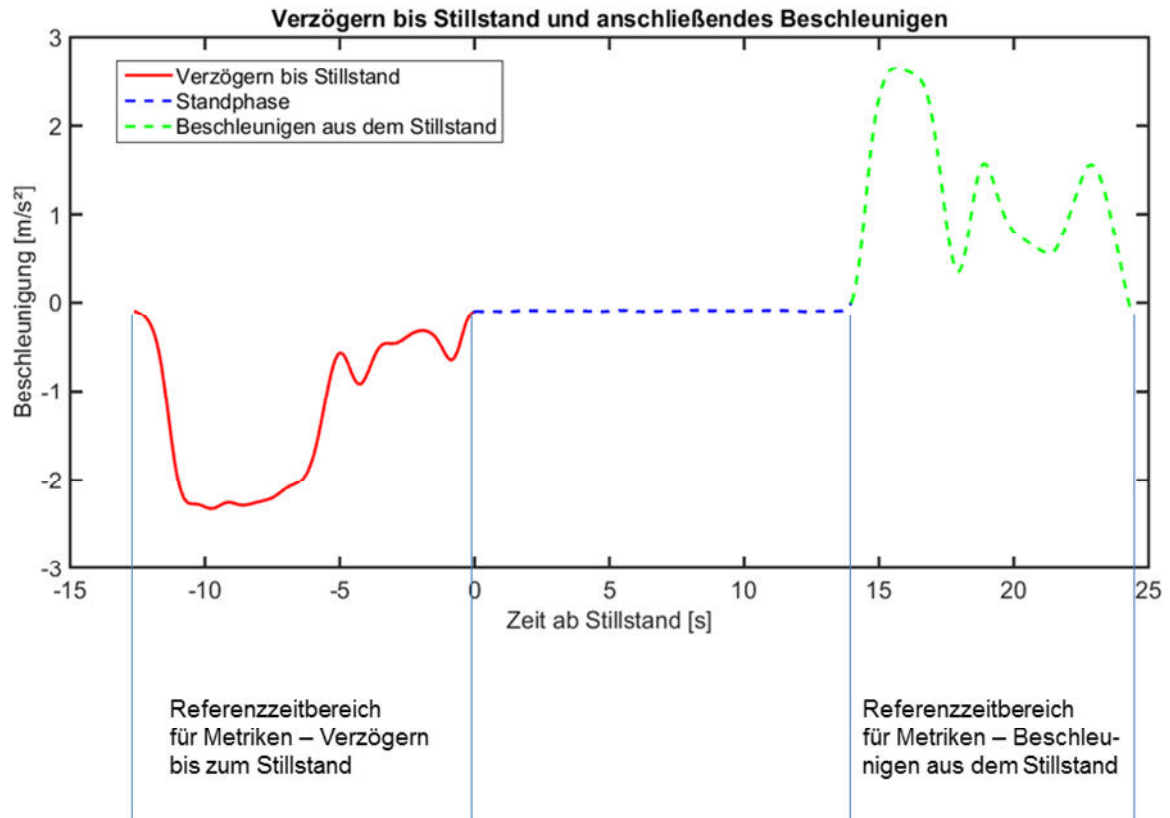
$$poj_i = \frac{N(\text{Beschleunigungswerte}_i)}{N(\text{Beschleunigungswerte})}$$

gebildet. Dieser entspricht aufgrund der konstanten Aufzeichnungsrate dem jeweiligen Zeitanteil des Rucks in der jeweiligen Klasse.



2. Manöverbezogene Metriken

Die manöverbezogenen Metriken werden analog zu 1, aber stets in Bezug auf den jeweiligen Referenzzeitbereich der Metriken Verzögern bis zum Stillstand oder Beschleunigen aus dem Stillstand berechnet.



2.1 Zeitanteile der Beschleunigung

Nach Einteilung der gemessenen Beschleunigungswerte in die Klassen

| Metrik | Wertebereich |
|--|--|
| - Anteil mechanischer Verzögerung | $a \leq -2,3 \text{ m/s}^2$ |
| - Anteil der Verzögerung von $-2,3 \text{ m/s}^2$ bis -2 m/s^2 | $-2,3 \text{ m/s}^2 < a \leq -2 \text{ m/s}^2$ |
| - Anteil der Verzögerung von -2 m/s^2 bis -1 m/s^2 | $-2 \text{ m/s}^2 < a \leq -1 \text{ m/s}^2$ |
| - Anteil der Beschleunigung von 0 m/s^2 bis 1 m/s^2 | 0 m/s^2 bis 1 m/s^2 |
| - Anteil der Beschleunigung von 1 m/s^2 bis 2 m/s^2 | 1 m/s^2 bis 2 m/s^2 |



wird jeweils der Quotient

$$poa_i = \frac{N(\text{Beschleunigungswerte}_i)}{N(\text{Beschleunigungswerte})}$$

gebildet. Dieser entspricht aufgrund der konstanten Aufzeichnungsrate dem jeweiligen Zeitanteil der Beschleunigung in der entsprechenden Klasse.

2.2. Maximum der Verzögerung

$$a_{\max-} = \text{MAX} (|a(\text{Referenzzeitbereich} - \text{Verzögern})|)$$

2.3. Maximum der Beschleunigung

$$a_{\max+} = \text{MAX} (|a(\text{Referenzzeitbereich} - \text{Beschleunigen})|)$$

2.4. Median der Verzögerung

$$a_{\text{med}-} = \text{MED} (a(\text{Referenzzeitbereich} - \text{Verzögern}))$$

2.5. Median der Beschleunigung

$$a_{\text{med}+} = \text{MED} (a(\text{Referenzzeitbereich} - \text{Beschleunigen}))$$

2.6 Standardabweichung der Verzögerung

$$a_{\text{sd}-} = \text{SD}(a(\text{Referenzzeitbereich} - \text{Verzögern}))$$

2.7 Standardabweichung der Beschleunigung

$$a_{\text{sd}+} = \text{SD}(a(\text{Referenzzeitbereich} - \text{Beschleunigen}))$$



Anhang B - Deskriptive Statistik des Gesamtdatensatzes

| <i>Metrik</i> | <i>Mittelwert</i> | <i>Standard- abweichung</i> | <i>25. Perzentil</i> | <i>Median</i> | <i>75 Perzentil</i> |
|--|-------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------|-------------------------|
| poa Mechanisches Bremsen | 0,32 | 0,50 | 0,00 | 0,16 | 0,42 |
| poa Regeneratives Verzög. | 17,14 | 6,65 | 13,04 | 16,61 | 17,14 |
| poa Konstantfahrt | 63,52 | 12,67 | 57,92 | 64,78 | 71,33 |
| poa Beschleunigen | 17,63 | 5,52 | 14,22 | 17,50 | 20,85 |
| poa <-5 m/s ² | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 5 m/s ² < poa < - 4 m/s ² | 0,02 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 4 m/s ² < poa < - 3 m/s ² | 0,10 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 0,12 |
| - 3 m/s ² < poa < - 2 m/s ² | 1,08 | 1,03 | 0,39 | 0,80 | 1,44 |
| - 2 m/s ² < poa < - 1 m/s ² | 6,01 | 2,82 | 4,18 | 5,68 | 7,42 |
| - 1 m/s ² < poa < - 0.4 m/s ² | 10,25 | 3,62 | 8,01 | 9,98 | 12,04 |
| 0,5 m/s ² < poa < 1,5 m/s ² | 11,34 | 3,87 | 8,93 | 11,03 | 13,38 |
| 1,5 m/s ² < poa < 2,5 m/s ² | 3,25 | 1,97 | 1,88 | 2,98 | 4,25 |
| 2,5 m/s ² < poa | 0,55 | 0,80 | 0,00 | 0,26 | 0,76 |
| VarC | 1,24 | 0,28 | 1,09 | 1,23 | 1,39 |
| 95. Perz. a ⁺ 0 - 40 km/h | 2,17 | 0,52 | 1,86 | 2,14 | 2,48 |
| 95. Perz. a ⁺ 40 - 60 km/h | 1,54 | 0,67 | 1,07 | 1,45 | 2,01 |
| 95. Perz. a ⁺ 60 - 110 km/h | 1,31 | 0,63 | 0,80 | 1,26 | 1,76 |
| 95. Perz. a ⁺ > 110 km/h | 0,88 | 0,41 | 0,63 | 0,91 | 1,18 |
| 95. Perz. a ⁻ 0 - 40 km/h | -0,43 | 0,06 | -0,45 | -0,43 | -0,42 |
| 95. Perz. a ⁻ 40 - 60 km/h | -0,45 | 0,16 | -0,45 | -0,42 | -0,41 |
| 95. Perz. a ⁻ 60 - 110 km/h | -0,46 | 0,21 | -0,44 | -0,42 | -0,40 |
| 95. Perz. a ⁻ > 110 km/h | -0,43 | 0,27 | -0,44 | -0,41 | -0,40 |
| poj < -9,5 m/s ³ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 9,5 m/s ³ < poj < -8.5 m/s ³ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 8,5 m/s ³ < poj < -7.5 m/s ³ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 7,5 m/s ³ < poj < -6.5 m/s ³ | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 6,5 m/s ³ < poj < -5.5 m/s ³ | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| - 5,5 m/s ³ < poj < -4.5 m/s ³ | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| - 4,5 m/s ³ < poj < -3.5 m/s ³ | 0,05 | 0,11 | 0,00 | 0,01 | 0,06 |



| | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| $- 3,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < -2.5 \text{ m/s}^3$ | 0,19 | 0,29 | 0,03 | 0,10 | 0,25 |
| $- 2,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < -1.5 \text{ m/s}^3$ | 1,20 | 1,06 | 0,45 | 0,92 | 1,63 |
| $- 1,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < -0.5 \text{ m/s}^3$ | 8,16 | 3,72 | 5,49 | 7,99 | 10,53 |
| $- 0,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 0.5 \text{ m/s}^3$ | 79,32 | 13,04 | 74,57 | 81,17 | 87,16 |
| $0,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 1.5 \text{ m/s}^3$ | 7,86 | 3,45 | 5,39 | 7,66 | 10,09 |
| $1,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 2.5 \text{ m/s}^3$ | 1,43 | 1,06 | 0,71 | 1,19 | 1,87 |
| $2,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 3.5 \text{ m/s}^3$ | 0,29 | 0,32 | 0,09 | 0,21 | 0,39 |
| $3,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj}$ | 0,08 | 0,14 | 0,00 | 0,03 | 0,10 |
| $v_m \text{ [km/h]}$ | 32,22 | 16,97 | 20,04 | 28,16 | 42,81 |
| a_m^+ | 1,03 | 0,21 | 0,92 | 1,02 | 1,14 |
| a_m^- | -0,23 | 0,10 | -0,29 | -0,22 | -0,16 |
| $ a _m$ | 0,45 | 0,14 | 0,37 | 0,44 | 0,53 |
| a_{sd} | 0,69 | 0,18 | 0,59 | 0,69 | 0,79 |



Anhang C - Normalisierter RMSE für die Näherungskurven

| <i>Metrik</i> | <i>Konstant</i> | <i>Linear</i> | <i>Powerlaw</i> | <i>Exponentiell</i> |
|--|-----------------|---------------|-----------------|---------------------|
| poa Mechanisches Bremsen | 1,6830 | 1,6851 | 1,6837 | 1,6909 |
| poa Regeneratives Verzög. | 0,3618 | 0,3619 | 0,3600 | 0,3683 |
| poa Konstantfahrt | 0,1620 | 0,1621 | 0,1615 | 0,1658 |
| poa Beschleunigen | 0,2848 | 0,2850 | 0,2842 | 0,2899 |
| poa < -5 m/s ² | 15,1213 | 15,1378 | 15,1224 | 15,1235 |
| - 5 m/s ² < poa < - 4 m/s ² | 4,0314 | 4,0374 | 4,0610 | 4,0842 |
| - 4 m/s ² < poa < - 3 m/s ² | 2,1947 | 2,1982 | 2,2159 | 2,2406 |
| - 3 m/s ² < poa < - 2 m/s ² | 0,9923 | 0,9900 | 0,9939 | 1,0075 |
| - 2 m/s ² < poa < - 1 m/s ² | 0,4803 | 0,4793 | 0,4778 | 0,4869 |
| - 1 m/s ² < poa < - 0.4 m/s ² | 0,2988 | 0,2989 | 0,2984 | 0,3126 |
| 0,5 m/s ² < poa < 1,5 m/s ² | 0,3111 | 0,3108 | 0,3103 | 0,3174 |
| 1,5 m/s ² < poa < 2,5 m/s ² | 0,6436 | 0,6446 | 0,6436 | 0,6443 |
| 2,5 m/s ² < poa | 1,5294 | 1,5316 | 1,5294 | 1,5298 |
| VarC | 0,2109 | 0,2111 | 0,2109 | 0,2127 |
| 95. Perz. a ⁺ 0 - 40 km/h | 0,2227 | 0,2226 | 0,2225 | 0,2224 |
| 95. Perz. a ⁺ 40 - 60 km/h | 0,4056 | 0,4060 | 0,4049 | 0,4054 |
| 95. Perz. a ⁺ 60 - 110 km/h | 0,4555 | 0,4568 | 0,4555 | 0,4575 |
| 95. Perz. a ⁺ > 110 km/h | 0,3375 | 0,3392 | 0,3348 | 0,3350 |
| 95. Perz. a ⁻ 0 - 40 km/h | 0,0583 | 0,0584 | 0,0583 | 0,0584 |
| 95. Perz. a ⁻ 40 - 60 km/h | 0,2667 | 0,2668 | 0,2657 | 0,2657 |
| 95. Perz. a ⁻ 60 - 110 km/h | 0,4172 | 0,4180 | 0,4162 | 0,4175 |
| 95. Perz. a ⁻ > 110 km/h | 0,4566 | 0,4618 | 0,4566 | 0,4566 |
| poj < -9,5 m/s ³ | 19,8875 | 19,8908 | 19,8925 | 19,8933 |
| - 9,5 m/s ³ < poj < -8.5 m/s ³ | 11,3098 | 11,3300 | 11,3351 | 11,3481 |
| - 8,5 m/s ³ < poj < -7.5 m/s ³ | 10,6307 | 10,6485 | 10,6306 | 10,6299 |
| - 7,5 m/s ³ < poj < -6.5 m/s ³ | 5,4151 | 5,4190 | 5,4246 | 5,4381 |
| - 6,5 m/s ³ < poj < -5.5 m/s ³ | 6,5400 | 6,5511 | 6,5408 | 6,5439 |
| - 5,5 m/s ³ < poj < -4.5 m/s ³ | 3,1938 | 3,1984 | 3,2170 | 3,2390 |
| - 4,5 m/s ³ < poj < -3.5 m/s ³ | 2,2394 | 2,2416 | 2,2481 | 2,2637 |
| - 3,5 m/s ³ < poj < -2.5 m/s ³ | 1,4329 | 1,4341 | 1,4323 | 1,4336 |



| | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| $- 2,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < -1.5 \text{ m/s}^3$ | 0,8204 | 0,8215 | 0,8203 | 0,8202 |
| $- 1,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < -0.5 \text{ m/s}^3$ | 0,4344 | 0,4351 | 0,4344 | 0,4419 |
| $- 0,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 0.5 \text{ m/s}^3$ | 0,1236 | 0,1238 | 0,1236 | 0,1249 |
| $0,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 1.5 \text{ m/s}^3$ | 0,4150 | 0,4157 | 0,4150 | 0,4239 |
| $1,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 2.5 \text{ m/s}^3$ | 0,7378 | 0,7388 | 0,7377 | 0,7376 |
| $2,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 3.5 \text{ m/s}^3$ | 1,1144 | 1,1162 | 1,1142 | 1,1143 |
| $3,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj}$ | 1,8965 | 1,8994 | 1,8961 | 1,8960 |
| $v_m \text{ [km/h]}$ | 0,5082 | 0,5091 | 0,5082 | 0,5145 |
| a_m^+ | 0,1777 | 0,1778 | 0,1776 | 0,1778 |
| a_m^- | 0,4509 | 0,4516 | 0,4500 | 0,4538 |
| $ a _m$ | 0,2959 | 0,2964 | 0,2954 | 0,2977 |
| a_{sd} | 0,2515 | 0,2519 | 0,2515 | 0,2517 |

Alle Probanden, alle Fahren; n = 35



Anhang D - Varianzanalyse für die Näherungskurven

| Metrik | df | F | p | sign. paarweiser Vergleich | | |
|--|----|-------|-------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | | Konstante. vs. Linearer Trend | Konstante, vs. Powerlaw | Konstante vs. Exponentiell |
| poa Mechanisches Bremsen | 3 | 0,144 | 0,933 | 1,000 | 1,000 | 0,939 |
| poa Regeneratives Verzög. | 3 | 0,211 | 0,888 | 1,000 | 0,999 | 0,936 |
| poa Konstantfahrt | 3 | 0,151 | 0,929 | 1,000 | 1,000 | 0,957 |
| poa Beschleunigen | 3 | 0,226 | 0,878 | 1,000 | 1,000 | 0,924 |
| poa <-5 m/s ² | 3 | 1,038 | 0,389 | 0,388 | 0,993 | 0,989 |
| - 5 m/s ² < poa < - 4 m/s ² | 3 | 2,989 | 0,034 | 1,000 | 0,402 | 0,071 |
| - 4 m/s ² < poa < - 3 m/s ² | 3 | 1,403 | 0,245 | 1,000 | 0,819 | 0,299 |
| - 3 m/s ² < poa < - 2 m/s ² | 3 | 0,707 | 0,549 | 0,999 | 0,999 | 0,576 |
| - 2 m/s ² < poa < - 1 m/s ² | 3 | 0,210 | 0,889 | 1,000 | 1,000 | 0,942 |
| - 1 m/s ² < poa < - 0.4 m/s ² | 3 | 0,484 | 0,694 | 1,000 | 1,000 | 0,773 |
| 0,5 m/s ² < poa < 1,5 m/s ² | 3 | 0,398 | 0,755 | 0,999 | 1,000 | 0,849 |
| 1,5 m/s ² < poa < 2,5 m/s ² | 3 | 0,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 2,5 m/s ² < poa | 3 | 0,002 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| VarC | 3 | 0,031 | 0,993 | 1,000 | 1,000 | 0,996 |
| 95. Perz. a ⁺ 0 - 40 km/h | 3 | 0,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 95. Perz. a ⁺ 40 - 60 km/h | 3 | 0,009 | 0,999 | 0,999 | 0,999 | 1,000 |
| 95. Perz. a ⁺ 60 - 110 km/h | 3 | 0,010 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 0,999 |
| 95. Perz. a ⁺ > 110 km/h | 3 | 0,004 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 95. Perz. a ⁻ 0 - 40 km/h | 3 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 95. Perz. a ⁻ 40 - 60 km/h | 3 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 95. Perz. a ⁻ 60 - 110 km/h | 3 | 0,004 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 95. Perz. a ⁻ > 110 km/h | 3 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| poj < -9,5 m/s ³ | 3 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| - 9,5 m/s ³ < poj < -8.5 m/s ³ | 3 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| - 8,5 m/s ³ < poj < -7.5 m/s ³ | 3 | 0,008 | 0,999 | 0,999 | 1,000 | 1,000 |
| - 7,5 m/s ³ < poj < -6.5 m/s ³ | 3 | 0,006 | 0,999 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| - 6,5 m/s ³ < poj < -5.5 m/s ³ | 3 | 1,203 | 0,313 | 1,000 | 0,981 | 0,388 |
| - 5,5 m/s ³ < poj < -4.5 m/s ³ | 3 | 3,552 | 0,016 | 1,000 | 0,344 | 0,030 |



| | | | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| $- 4,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < -3.5 \text{ m/s}^3$ | 3 | 2,084 | 0,105 | 0,996 | 0,719 | 0,108 |
| $- 3,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < -2.5 \text{ m/s}^3$ | 3 | 0,015 | 0,998 | 0,999 | 1,000 | 0,998 |
| $- 2,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < -1.5 \text{ m/s}^3$ | 3 | 0,002 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| $- 1,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < -0.5 \text{ m/s}^3$ | 3 | 0,281 | 0,839 | 1,000 | 1,000 | 0,879 |
| $- 0,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 0.5 \text{ m/s}^3$ | 3 | 0,030 | 0,993 | 1,000 | 1,000 | 0,995 |
| $0,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 1.5 \text{ m/s}^3$ | 3 | 0,293 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,870 |
| $1,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 2.5 \text{ m/s}^3$ | 3 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| $2,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj} < 3.5 \text{ m/s}^3$ | 3 | 0,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| $3,5 \text{ m/s}^3 < \text{poj}$ | 3 | 0,004 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| v_m [km/h] | 3 | 0,050 | 0,985 | 1,000 | 1,000 | 0,989 |
| a_m^+ | 3 | 0,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| a_m^- | 3 | 0,025 | 0,995 | 1,000 | 1,000 | 0,997 |
| $ a _m$ | 3 | 0,023 | 0,995 | 1,000 | 1,000 | 0,997 |
| a_{sd} | 3 | 0,001 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Alle Probanden, alle Fahrten; n = 35



Anhang E - t-Tests für den Vergleich Normal-Sparsam

N = 41; Referenzstrecke

| <i>Gesamtstrecke</i> | <i>Normal</i> | | <i>Sparsam</i> | | <i>t(40)</i> | <i>Signifikanz (2-seitig)</i> |
|-----------------------------------|---------------|-----------|----------------|-----------|--------------|-----------------------------------|
| | <i>M</i> | <i>SD</i> | <i>M</i> | <i>SD</i> | | |
| Anteil mech. Verz. | 0,13 | 0,14 | 0,07 | 0,07 | 2,379 | 0,022 |
| Anteil reg. Verz. | 21,33 | 3,28 | 20,12 | 4,33 | 2,019 | 0,050 |
| Konstantfahrtanteil | 58,24 | 5,39 | 70,12 | 4,89 | -13,159 | 0,000 |
| Anteil Beschl. | 20,30 | 2,59 | 15,56 | 2,57 | 11,030 | 0,000 |
| VarC | 1,36 | 0,20 | 1,06 | 0,14 | 11,239 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁺ , 0-40 | 2,24 | 0,37 | 1,82 | 0,26 | 6,986 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁺ , 40-60 | 2,23 | 0,46 | 1,74 | 0,32 | 6,251 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁺ , 60-110 | 2,03 | 0,43 | 1,44 | 0,26 | 9,020 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁺ , 110+ | 1,71 | 0,40 | 1,17 | 0,21 | 8,157 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁻ , 0-40 | -0,44 | 0,07 | -0,42 | 0,02 | -1,312 | 0,197 |
| 95. Perz. a ⁻ , 40-60 | -0,47 | 0,08 | -0,47 | 0,07 | 0,280 | 0,781 |
| 95. Perz. a ⁻ , 60-110 | -0,45 | 0,03 | -0,45 | 0,03 | -0,504 | 0,617 |
| 95. Perz. a ⁻ , 110+ | -0,41 | 0,01 | -0,41 | 0,01 | 1,123 | 0,268 |
| Mittlere Celeration | 0,42 | 0,06 | 0,30 | 0,04 | 12,984 | 0,000 |
| SD Beschleunigung | 0,64 | 0,09 | 0,48 | 0,06 | 12,340 | 0,000 |



| Autobahn | Normal | | Sparsam | | t(40) | Signifikanz (2-seitig) |
|--------------------------|---------------|-----------|----------------|-----------|--------------|-----------------------------------|
| | M | SD | M | SD | | |
| Anteil mech. Verz. | 0,03 | 0,09 | 0,04 | 0,11 | -0,742 | 0,462 |
| Anteil reg. Verz. | 20,42 | 4,89 | 19,44 | 6,92 | 0,975 | 0,336 |
| Konstantfahrtanteil | 62,53 | 8,89 | 77,49 | 7,21 | -9,315 | 0,000 |
| Anteil Beschl. | 17,02 | 4,63 | 11,89 | 4,23 | 6,269 | 0,000 |
| VarC | 1,40 | 0,27 | 1,01 | 0,17 | 8,080 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁺ | 1,97 | 0,38 | 1,53 | 0,33 | 5,760 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁻ | -0,41 | 0,01 | -0,41 | 0,01 | -0,948 | 0,349 |
| Mittlere Celeration | 0,36 | 0,08 | 0,23 | 0,05 | 9,586 | 0,000 |
| SD Beschleunigung | 0,54 | 0,11 | 0,37 | 0,06 | 8,929 | 0,000 |

| Landstraße (einspurig) | Normal | | Sparsam | | t(40) | Signifikanz (2-seitig) |
|-----------------------------------|---------------|-----------|----------------|-----------|--------------|-----------------------------------|
| | M | SD | M | SD | | |
| Anteil mech. Verz. | 0,10 | 0,22 | 0,04 | 0,11 | 1,583 | 0,121 |
| Anteil reg. Verz. | 18,73 | 4,88 | 16,82 | 4,60 | 6,341 | 0,000 |
| Konstantfahrtanteil | 63,05 | 7,47 | 78,28 | 6,36 | -12,336 | 0,000 |
| Anteil Beschl. | 18,11 | 4,11 | 11,18 | 3,48 | 9,497 | 0,000 |
| VarC | 1,49 | 0,32 | 1,07 | 0,22 | 8,063 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁺ | 2,08 | 0,48 | 1,58 | 0,31 | 5,502 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁻ | -0,42 | 0,01 | -0,42 | 0,02 | 1,390 | 0,172 |
| Mittlere Celeration | 0,36 | 0,07 | 0,23 | 0,05 | 11,858 | 0,000 |
| SD Beschleunigung | 0,57 | 0,11 | 0,39 | 0,08 | 9,902 | 0,000 |



| Zweispurige Ausfallstraße | Normal | | Sparsam | | t(40) | Signifikanz (2-seitig) |
|--------------------------------------|---------------|-----------|----------------|-----------|--------------|-----------------------------------|
| | M | SD | M | SD | | |
| Anteil mech. Verz. | 0,26 | 0,55 | 0,09 | 0,36 | 1,699 | 0,097 |
| Anteil reg. Verz. | 26,71 | 7,13 | 25,10 | 8,06 | 1,492 | 0,144 |
| Konstantfahrtanteil | 54,33 | 9,48 | 63,72 | 8,56 | -5,367 | 0,000 |
| Anteil Beschl. | 18,70 | 4,38 | 16,30 | 4,63 | 2,646 | 0,012 |
| VarC | 1,35 | 0,28 | 0,99 | 0,21 | 8,425 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁺ | 2,16 | 0,56 | 1,45 | 0,36 | 7,434 | |
| 95. Perz. a ⁻ | -0,43 | 0,03 | -0,44 | 0,03 | 0,560 | 0,578 |
| Mittlere Celeration | 0,49 | 0,12 | 0,35 | 0,08 | 7,577 | 0,000 |
| SD Beschleunigung | 0,74 | 0,16 | 0,54 | 0,11 | 8,507 | 0,000 |

| Zone60 | Normal | | Sparsam | | t(40) | Signifikanz (2-seitig) |
|--------------------------|---------------|-----------|----------------|-----------|--------------|-----------------------------------|
| | M | SD | M | SD | | |
| Anteil mech. Verz. | 0,24 | 0,48 | 0,14 | 0,29 | 0,968 | 0,339 |
| Anteil reg. Verz. | 19,74 | 4,66 | 20,65 | 7,84 | -0,652 | 0,518 |
| Konstantfahrtanteil | 58,20 | 9,24 | 62,93 | 7,60 | -2,622 | 0,012 |
| Anteil Beschl. | 21,82 | 5,34 | 20,13 | 4,83 | 1,602 | 0,117 |
| VarC | 1,29 | 0,26 | 1,09 | 0,18 | 4,593 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁺ | 2,10 | 0,46 | 1,57 | 0,32 | 6,694 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁻ | -0,43 | 0,02 | -0,43 | 0,02 | 0,226 | 0,823 |
| Mittlere Celeration | 0,45 | 0,10 | 0,38 | 0,07 | 4,392 | 0,000 |
| SD Beschleunigung | 0,69 | 0,14 | 0,58 | 0,09 | 4,863 | 0,000 |



| Zone30 | <i>Normal</i> | | <i>Sparsam</i> | | <i>t(40)</i> | <i>Signifikanz (2-seitig)</i> |
|--------------------------|---------------|-----------|----------------|-----------|--------------|-----------------------------------|
| | <i>M</i> | <i>SD</i> | <i>M</i> | <i>SD</i> | | |
| Anteil mech. Verz. | 0,13 | 0,29 | 0,08 | 0,21 | 0,791 | 0,433 |
| Anteil reg. Verz. | 24,57 | 4,15 | 22,63 | 4,19 | 5,094 | 0,000 |
| Konstantfahrtanteil | 52,07 | 7,53 | 61,17 | 9,14 | -7,329 | 0,000 |
| Anteil Beschl. | 23,23 | 3,97 | 19,29 | 4,66 | 6,158 | 0,000 |
| VarC | 1,17 | 0,16 | 0,97 | 0,19 | 7,437 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁺ | 1,88 | 0,33 | 1,60 | 0,26 | 5,432 | 0,000 |
| 95. Perz. a ⁻ | -0,43 | 0,01 | -0,43 | 0,01 | -0,774 | 0,444 |
| Mittlere Celeration | 0,48 | 0,08 | 0,38 | 0,09 | 9,773 | 0,000 |
| SD Beschleunigung | 0,69 | 0,10 | 0,56 | 0,11 | 9,125 | 0,000 |