
AKZEPTABLE UND EFFEKTIVE PEDAL- UND MOTORKENNLINIEN ZUR UNTERSTÜTZUNG VON ECO-DRIVING IM ELEKTROFAHRZEUG

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Fakultät für
Humanwissenschaften der Julius-Maximilians-Universität Würzburg



Vorgelegt von

Monika Sarah Jagiełłowicz-Kaufmann aus Wertheim

Würzburg 2016

Gutachter:

Prof. Dr. A. Kiesel

Prof. Dr. W. Kunde

Tag des Kolloquiums: 27.07.2016

DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand zum Teil im Rahmen des EU-Projektes „eFuture“, das Förderungen von der Europäischen Kommission innerhalb des siebten Forschungsrahmenprogramms (FP7/2007-2013) erhielt. Alle Studien sind am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW GmbH) durchgeführt worden. An dieser Stelle danke ich daher dem gesamten eFuture-Team und dem WIVW für das Ermöglichen dieser Arbeit.

Mein außerordentlicher Dank gilt Prof. Dr. Andrea Kiesel, die mich mit viel Geduld, wertvollen Anregungen und ihrer positiven Einstellung stets unterstützt hat, diese Arbeit zu schreiben und zu beenden. Eine bessere Betreuung hätte ich mir nicht wünschen können. Darüber hinaus danke ich Prof. Dr. Hans-Peter Krüger, der mir diese Arbeit ermöglicht und diese in der ersten Phase begleitet hat.

Außerdem danke ich meinen eFuture-Kollegen, allen voran Marcus Schmitz, Christian Maag und Michael Hanig für die angenehme und fruchtbare Zusammenarbeit, die kompetente Unterstützung bei allen aufkommenden Problemen sowie den konstruktiven Diskussionen. Ohne euch wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Außerdem möchte ich Lena Rittger und Thomas Hammer danken, die mich zu dieser Zeit als studentische Hilfskräfte, Praktikanten und Diplomanden unterstützt haben.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen fleißigen Korrekturlesern und -leserinnen.

Größter Dank gilt auch meinen Freunden und insbesondere meiner Familie, die nie aufgehört haben an mich zu glauben und mich stets ermutigt haben, weiterzumachen.

Abschließend möchte ich meinem Mann Felix danken, der ebenfalls eine buddhistisch anmutende Geduld mit mir bewiesen hat, gelernt hat, mir keine weiteren Fragen zum Fortschritt meiner Arbeit und stattdessen die „richtigen“ Fragen zu stellen und mich unermüdlich motiviert und unterstützt hat. Und schließlich möchte ich meiner Tochter Marlena dafür danken, dass sie mich mit ihrem fröhlichen und unkomplizierten Wesen diese Arbeit hat fertig schreiben lassen.

KURZZUSAMMENFASSUNG

Die begrenzte Reichweite ist einer der Hauptgründe für das derzeitige mangelnde Kaufinteresse an Elektrofahrzeugen. Neben rein komponentenoptimierenden Maßnahmen, wie der Verbesserung der Batterie, ist die Förderung von Eco-Driving, also einer energieeffizienten Fahrweise, ein effektiver Ansatz zur Steigerung der Reichweite. Trainings und visuell dargebotene Eco-Assistenten können Eco-Driving wirksam steigern, schöpfen aber nicht dessen gesamtes Potential aus. Angepasste Pedal- und Motorkennlinien könnten Eco-Driving zusätzlich fördern. Für deren Bewertung sind die Wirksamkeit und Akzeptanz bisher nicht gemeinsam berücksichtigt worden oder sie wurden nicht im Elektrofahrzeug evaluiert und validiert. Zu diesen Anpassungen zählen eine Veränderung des Beschleunigungspedals, sodass mit diesem gleichzeitig beschleunigt und rekuperiert werden kann, die Limitierung von Drehmoment und Leistung und der Einsatz eines aktiven Beschleunigungspedals, welches Widerstände abhängig von Fahrzeug- oder Situationsparametern aktiviert.

Für diese Arbeit habe ich daher die Pedal- und Motorkennlinien entsprechend angepasst und in ein validiertes Elektroautomodell implementiert. Ziel war es, verschiedene Fahrverhaltensbereiche im Elektrofahrzeug, die Eco-Driving kennzeichnen (energieoptimales Beschleunigen und Verzögern, Einhalten von Geschwindigkeitsbegrenzungen, vorausschauendes Fahren), benutzerfreundlich, akzeptabel und wirksam zu unterstützen. Zu diesem Zweck habe ich vier Probandenstudien im bewegten Fahrsimulator durchgeführt und geeignete Pedal- und Motorkennlinien empirisch bestimmt. In der ersten Studie habe ich untersucht, ob und warum eine Pedalkennlinie zu bevorzugen ist, bei der mit dem Beschleunigungspedal anstelle des Bremspedals rekuperiert wird. Das Ziel der zweiten Studie war es, eine geeignete Rekuperationsstärke für ein kombiniertes Beschleunigungspedal, bei dem mit dem Beschleunigungspedal rekuperiert wird, zu bestimmen. In der dritten Studie habe ich evaluiert, ob die Limitierung der Leistung oder die des Drehmoments zu bevorzugen ist, um das Beschleunigungsverhalten zu optimieren und wie stark die Limitierungen optimaler Weise sein sollten. Basierend auf den Ergebnissen der dritten Studie, habe ich schließlich einen optimierten Limitierungsansatz konzipiert, diesen mit einem aktiven Beschleunigungspedal verglichen und bestimmt, welcher Ansatz zu bevorzugen ist.

Aufgrund der Studienergebnisse werden folgende Ansätze für die jeweiligen Eco-Driving-Fahrverhaltensbereiche empfohlen und es werden folgende Gestaltungsempfehlungen abgeleitet: Zur Förderung eines energieeffizienten **Beschleunigungsverhaltens** ist die Limitierung von Drehmoment und Leistung geeignet. Die Limitierung des Drehmoments ist hierbei besonders wirksam in geringen, die Limitierung der maximalen Leistung in höheren Geschwindigkeitsbereichen. Zu empfehlen sind parallele mittelstarke Limitierungen von maximalem Drehmoment und maximaler Leistung, die Beschleunigungen mit 2.0 m/s^2 erlauben, bei gleichzeitiger Bereitstellung eines Kick-Downs. Ein aktives Beschleunigungspedal ist insbesondere aus Gründen der Benutzerfreundlichkeit zur Förderung eines energieeffizienten Beschleunigungsverhaltens nur eingeschränkt empfehlenswert.

Zur Förderung eines energieeffizienten **Verzögerungsverhaltens** wird die Implementierung der Rekuperationsfunktion auf dem Beschleunigungspedal anstelle des Bremspedals empfohlen, da dies einerseits ermöglicht, auf hydraulisches Bremsen zu verzichten und gleichzeitig mehr Energie rekuperiert werden kann. Ersteres trägt zu einer hohen Akzeptanz bei, letzteres zu einer günstigen Energiebilanz. Besonders effektiv und akzeptabel ist ein kombiniertes Fahrbremspedal, wenn es eine starke Rekuperation ermöglicht (zwischen -1.7 und -2.1 m/s²). Weiterhin ist ein aktives Beschleunigungspedal, das den geeigneten Zeitpunkt für eine maximal energieeffiziente Verzögerung mit einem kombinierten Fahrbremspedal anzeigt, wirksam, um die rekuperierte Energie zu steigern. Auf diese Weise kann zudem eine **vorausschauende Fahrweise** unterstützt werden. Hierbei muss jedoch die Funktionalität und Benutzerfreundlichkeit optimiert werden, um eine gesteigerte kognitive Fahrerbeanspruchung und Minderungen der Akzeptanz zu vermeiden. Zur Unterstützung der Einhaltung von **Geschwindigkeitsbegrenzungen** ist ebenfalls das aktive Beschleunigungspedal geeignet. Der Fahrer sollte hierbei aber die Möglichkeit haben, individuell Grenzwerte einzustellen.

Die Verknüpfung eines kombinierten Fahrbremspedals mit einer Limitierung von Drehmoment und Leistung sowie einem aktiven Beschleunigungspedal kann abschließend, unter Berücksichtigung der abgeleiteten Gestaltungsempfehlungen, als effektive und akzeptable Möglichkeit zur Förderung unterschiedlicher Verhaltensbereiche von Eco-Driving bewertet werden. Die erwarteten Synergieeffekte der evaluierten Ansätze in Verbindung mit Eco-Trainings und visuell dargebotenen Eco-Feedback-Assistenten sowie deren Langfristigkeit sollten Gegenstand weiterführender Forschung sein.

INHALTSVERZEICHNIS

1	ALLGEMEINER HINTERGRUND UND MOTIVATION.....	9
1.1	EINFÜHRUNG.....	9
1.2	FÖRDERUNG VON ECO-DRIVING	11
1.2.1	Fahrertrainings und Eco-Assistenten	11
1.2.2	Veränderung von Pedal- und Motorkennlinien.....	12
1.3	STRUKTUR DER ARBEIT	13
2	THEORETISCHER TEIL	14
2.1	ECO-DRIVING.....	14
2.1.1	Definition	14
2.1.2	Regeln	15
2.2	DAS ELEKTROAUTO.....	15
2.2.1	Elektromotor vs. Verbrennungsmotor.....	15
2.2.2	Regeneratives vs. hydraulisches Bremsen	16
2.3	PEDAL- UND MOTORKENNLINIEN.....	17
2.3.1	Kombiniertes Fahrbremspedal	18
2.3.2	Limitierungsansatz	19
2.3.3	Aktives Beschleunigungspedal	20
2.4	AKZEPTANZ UND EFFEKTIVITÄT	21
2.4.1	Wahrgenommener Nutzen	22
2.4.2	Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	24
2.5	KOGNITIVE PROZESSE	28
2.6	ZUSAMMENFASSUNG UND FRAGESTELLUNG	32
3	EMPIRISCHER TEIL	35
3.1	ALLGEMEINE UNTERSUCHUNGSMETHODIK	35
3.1.1	Beschreibung des Fahrsimulators	35
3.1.2	Das Elektroautomodell für die Fahrsimulation	35
3.1.3	Die Teststrecke.....	36
3.1.4	Die Stichprobe.....	38
3.1.5	Messparameter	38
3.1.6	Datenaufbereitung, statistische Auswertung und Diagramme	39
3.2	STUDIE I: DAS KOMBINIERTES FAHRBREMSPEDAL	40
3.2.1	Fragestellung.....	40
3.2.2	Methoden	41

3.2.3	Ergebnisse.....	44
3.2.4	Diskussion	53
3.3	STUDIE II: DIE STÄRKE DER REKUPERATIVEN BREMSE	55
3.3.1	Fragestellung	55
3.3.2	Methoden.....	57
3.3.3	Ergebnisse.....	59
3.3.4	Diskussion	66
3.4	STUDIE III: LIMITIERUNG VON LEISTUNG UND DREHMOMENT	68
3.4.1	Fragestellung	68
3.4.2	Methoden.....	69
3.4.3	Ergebnisse.....	72
3.4.4	Diskussion	80
3.5	STUDIE IV: DAS AKTIVE BESCHLEUNIGUNGSPEDAL	82
3.5.1	Aktueller Forschungsstand zum aktiven Beschleunigungspedal.....	82
3.5.2	Fragestellung	84
3.5.3	Methoden.....	85
3.5.4	Ergebnisse.....	89
3.5.5	Diskussion	98
4	ABSCHLIEßENDE DISKUSSION	101
4.1	KURZZUSAMMENFASSUNG DER STUDIEN	101
4.2	ZUSAMMENFASSUNG UND GESTALTUNGSEMPFEHLUNGEN	102
4.2.1	Beschleunigungsverhalten	102
4.2.2	Verzögerungsverhalten.....	103
4.2.3	Einhalten von Geschwindigkeitsbegrenzungen.....	103
4.2.4	Vorausschauendes Fahren	104
4.2.5	Einfluss des Fahrertyps.....	105
4.2.6	Kognitive Beanspruchung	105
4.3	AUSBLICK	106
4.3.1	Anwendungsmöglichkeiten	106
4.3.2	Einschränkungen und weiterer Forschungsbedarf.....	107
5	LITERATURVERZEICHNIS	108
6	APPENDIX	115
6.1	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	115
6.2	DIE TESTSTRECKEN	116
6.2.1	Studie II: Die Stärke der rekuperativen Bremse	116

6.2.2	Studie III: Limitierung von Drehmoment und Leistung	117
6.2.3	Studie IV: Das aktive Beschleunigungspedal	118
6.3	TABELLEN UND STATISTIKEN	119
6.3.1	Studie I: Das kombinierte Fahrbremspedal.....	119
6.3.2	Studie II: Die Stärke der rekuperativen Bremse	120
6.3.3	Studie III: Limitierung von Drehmoment und Leistung	121
6.3.4	Studie IV: Das aktive Beschleunigungspedal	125
6.4	TESTMATERIALIEN.....	129
6.4.1	Studie IV: Das aktive Beschleunigungspedal	129

1 ALLGEMEINER HINTERGRUND UND MOTIVATION

1.1 EINFÜHRUNG

Vor dem Hintergrund der fortschreitenden Ausschöpfung nicht regenerativer Energien, der globalen Klimaerwärmung und den damit verbundenen wetterbedingten Katastrophen wird die Reduktion von CO₂-Emissionen sowie weiterer relevanter Treibhausgase zum weltweiten Ziel erklärt. Aus dem aktuellen Bericht der „International Energy Agency“ geht hervor, dass 22 % der CO₂-Emissionen auf den Transportsektor zurückgeführt werden können und der Straßenverkehr (in Abgrenzung von beispielsweise Schienen- oder Luftverkehr) hierbei drei Viertel des Transportsektors ausmachen (OECD/IAE, 2013). Diese Daten zeigen, dass die Optimierung des Straßenverkehrssektors ein enormes Potential zur Einsparung von Treibhausgasen birgt.

Im integrierten Energie- und Klimaprogramm der deutschen Bundesregierung wird die Elektromobilität daher als wichtiger Bestandteil zur Senkung von CO₂-Emissionen genannt und es wurde ein „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität“ erstellt (Bundesregierung, 2009). Auch in der Automobilindustrie ist man von der Elektromobilität überzeugt und so proklamierte Herr Winterkorn 2008, damals Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG, dass Elektrofahrzeuge unsere Zukunft seien (Diekmann & Santen, 2008). Bundeskanzlerin Merkel setzte schließlich ein ehrgeiziges Ziel für Deutschland, nämlich eine Millionen Elektroautos bis 2020 auf deutschen Straßen zu haben (Berthold, 2011). Im Januar 2014 waren jedoch erst 12156 Personenkraftwagen mit Elektroantrieb auf deutschen Straßen registriert (Statista, 2015).

Obwohl rein objektiv betrachtet die Reichweite heutiger Elektrofahrzeuge für mindestens 17 % (und unter kleineren Einschränkungen sogar 32 %) der Autofahrer vollkommen ausreichend wäre, um alle täglichen Autofahrten zu tätigen (Pearre, Kempton, Guensler, & Elango, 2011), wächst der Wunsch nach einem Elektroauto in Deutschland nur verhalten an. Neben den vergleichsweise hohen Anschaffungskosten für Elektroautos liegt dies zum größten Teil an der wahrgenommenen geringen Reichweite bzw. Laufzeit der Batterie (Chéron & Zins, 1997; Lebeau, Van Mierlo, Lebeau, Mairesse, & Macharis, 2013). Eine jüngere Studie konnte zeigen, dass sich Fahrer, die ein Elektrofahrzeug über einen längeren Zeitraum benutzen, mit der Reichweite zufriedenstellend arrangieren (Franke, Neumann, Bühler, Cocron, & Krems, 2012). Dieses Ergebnis sowie die Tatsache, dass Elektrofahrzeuge, auch rein objektiv betrachtet, für viele Autofahrer und deren alltäglichen Gebrauch geeignet wären, deuten darauf hin, dass der Kauf von Elektrofahrzeugen durch den Abbau psychologischer Barrieren, beispielsweise mittels gezielter Informationskampagnen, begünstigt werden kann.

Dennoch zeigt ein Vergleich von Elektrofahrzeugen mit Fahrzeugen mit internen Verbrennungsmotoren (Internal combustion engine vehicle - ICEV) die derzeitigen Schwächen recht deutlich: Während ICEVs in wenigen Minuten betankt werden und zwischen 500-1000 km Reichweite erreichen, dauert ein vollständiger Ladevorgang bei Elektrofahrzeugen bis zu acht (oder mehr) Stunden und die Reichweite beträgt zwischen

100-250 km. Letztlich kann das Ziel, mehr Autofahrer für den Kauf von Elektrofahrzeugen zu gewinnen, nur dann erreicht werden, wenn die Reichweite objektiv erhöht wird.

In der Forschung, Wirtschaft und Politik wird dem Problem der begrenzten Reichweite von Elektroautos bereits auf vielfältige Weise begegnet. Hierbei werden alle drei Bestandteile des Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Systems (s. Abbildung 1) berücksichtigt. Das dargestellte Strukturbild zeigt auf, dass sich der Fahrer, die Umwelt und das Fahrzeug gegenseitig beeinflussen und Maßnahmen, sei es im Bereich der Energieeffizienz oder beispielsweise der Fahrsicherheit, sich nicht ausschließlich auf einen der drei Bereiche beschränken dürfen.

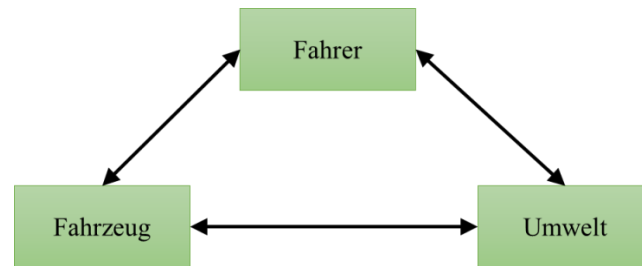


Abbildung 1: Strukturbild des Fahrer-Fahrzeug-Umwelt Systems.

Auf Seiten der Umwelt wird beispielsweise daran gearbeitet, den Verkehrsfluss im Stadtgebiet über Car-to-Car oder Car-to-X-Kommunikation zu optimieren oder mit Hilfe von Grüne-Welle-Anzeigetafeln den Fahrer dabei zu unterstützen, unnötige Brems- und Beschleunigungsvorgänge zu vermeiden. Fahrzeugseitig werden große Anstrengungen unternommen, komponentenbasierte Optimierungsmaßnahmen zu entwickeln, wie beispielsweise die Verbesserung der Batterieleistung, eine Verbesserung der Fahrzeugaerodynamik, die Verwendung leichterer Materialien für den Bau der Karosserie oder die Verbesserung der E/E-Architektur¹. Komponentenbasierte Optimierungsmaßnahmen sind allerdings häufig mit sehr hohen Entwicklungs- oder späteren Anschaffungskosten verbunden, die in einem ungünstigen Verhältnis zum tatsächlichen Effizienzgewinn stehen (Radke, 2013). Rein komponentenbasierte oder umweltbezogene Maßnahmen reizen zudem nicht das volle Potential der CO₂-Emissionsreduktion aus, denn noch fahren keine vollautomatisierten Fahrzeuge auf unseren Straßen und noch ist der Fahrer ein wichtiger Teil des Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Systems und steht in Interaktion mit diesen Ebenen. Er muss sich beispielsweise nicht an die Grüne-Welle-Anzeige halten und auch wenn die Aerodynamik des Fahrzeuges optimiert wurde, kann der Fahrer diese durch das Fahren mit offenen Fenstern verschlechtern.

Durch das Anwenden eines energieeffizienten Fahrstils, dem sogenannten Eco-Driving, lassen sich zwischen 5-25 % (Van Mierlo, Maggetto, Van de Burgwal, & Gense, 2004), auf bestimmten Streckenabschnitten sogar bis zu 35 % (Dorrer, 2004) des Verbrauches einsparen. Die große Streuung der Ergebnisse basiert zum einen auf der Methodik, mit der Eco-Driving erfasst wird, und zum anderen auf der Art und Weise, mit der Eco-Driving gefördert wurde. Dabei bedarf es nicht zwingend einer Maßnahme, um Eco-Driving zu fördern oder den Effekt von Eco-Driving zu verdeutlichen. Beispielsweise wurden in einer

¹ E/E = Elektrik/Elektronik

Studie von Helmbrecht, Bengler und Vilimek (2014) 27 erfahrene Elektroauto-Fahrer gebeten, zweimal eine 31 km lange Teststrecke zu fahren. Einmal sollten sie wie gewohnt fahren, das andere Mal wurde sie gebeten so energiesparsam wie möglich zu fahren (die Reihenfolge wurde hierbei permutiert). Die Fahrten wurden mit den gleichen Elektrofahrzeugen durchfahren, die alle Fahrer bereits zuvor mindestens zwei Monate lang privat oder geschäftlich nutzten. Im Mittel konnten die Fahrer 26.8 % der Energie einsparen, wenn sie gebeten wurden, energieeffizient zu fahren und das ganz ohne vorheriges Training oder Eco-Feedback-Assistenten.

1.2 FÖRDERUNG VON ECO-DRIVING

Das Ergebnis der Studie von Helmbrecht et al. (2014) zeigt das Potential eines energieeffizienten Fahrstils zur Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen. Diesem wird in vielfältigen Ansätzen und Technologien, die das Fahrverhalten positiv beeinflussen sollen, begegnet. Vor allem zwei Ansätze werden diesbezüglich in der Literatur häufig erwähnt: Fahrertrainings sowie sogenannte Eco-Assistenten, die in Form von integrierten (Assistenz-)Systemen oder über Applikationen auf dem mobilen Telefon abgespielt werden können. Im Folgenden erläutere ich zunächst diese Ansätze, zu deren Effektivität es bereits wissenschaftliche Studien gibt und zeige auf, warum weitere Ansätze zur Förderung von Eco-Driving notwendig sind. Anschließend stelle ich die Anpassung von Pedal- und Motorkennlinien als ergänzende Möglichkeit zur Förderung von Eco-Driving vor, deren Wirksamkeit und Akzeptanz ich im Rahmen meiner Dissertation untersuche.

1.2.1 Fahrertrainings und Eco-Assistenten

Grundvoraussetzung für die Anwendung von Eco-Driving ist es, die Prinzipien einer energieeffizienten Fahrweise zu kennen. Neben Informationen im Internet zum Eco-Driving werden derzeit auch spezielle Trainingsprogramme für Fahrer entwickelt und angeboten, beispielsweise vom ADAC (ADAC e.V., 2016). Die Wirksamkeit und die Dauer der Wirkung solcher Fahrertrainings ist bereits Gegenstand einiger Studien gewesen. Rose und Symmons (2008) fassen in ihrem Artikel die Ergebnisse von neun Trainingsstudien, die sowohl an Personenkraftwagen aber auch Bussen und Lastkraftwagen durchgeführt wurden, wie folgt zusammen: Fahrertrainings reduzieren den Verbrauch zwischen 2% und 25%. Als Grund für die variierenden Befunde in der Literatur sehen die Autoren die Vielfalt der methodischen Zugänge aber auch der Trainings selbst. Die Autoren resümieren, dass es zwar möglich ist, mit Hilfe eines Trainings oder sogar nur der Bitte energieeffizient zu fahren, zum Teil beachtliche Erfolge zu erzielen, die Herausforderung besteht allerdings darin, dieses Verhalten auch langfristig beizubehalten. Barkenbus (2010) schätzt die langfristigen Effekte von Fahrertrainings auf 5 %.

Eco-Driving dauerhaft anzuwenden scheint also weniger ein Problem des Wissens oder besser gesagt des Vergessens als vielmehr ein Problem der Motivation zu sein (Van Mierlo et al., 2004). Mit dem Ziel, den Fahrer zu einem energieeffizienten Fahrverhalten dauerhaft zu motivieren, werden daher zunehmend Eco-Assistenz-Systeme in das Fahrzeug implementiert. Witzani (2014) fasst diese Ansätze, die den Fahrstil des Fahrers beeinflussen sollen, unter dem Begriff *persuasive Technologien* zusammen, die von *Eco-Feedback* bis hin zu *Gamification* reichen. Unter Eco-Feedback sind Technologien zu

verstehen, die dem Fahrer Rückmeldung zu seinem Fahrstil geben. Unter Gamification versteht man die Einbindung von Spielelementen in das Fahrzeug, um die Motivation Eco-Driving fortzusetzen, zu steigern. Klunder et al. (2009) kommen zu dem Schluss, dass mit Hilfe derartiger Eco-Assistenten zwischen 10-15 % des CO²-Ausstoßes (in Europa) verringert werden können. Barkenbus (2010) schätzt das Energieeinsparpotential von Feedbacksystemen bei langfristiger Nutzung auf 10 %.

Das Energieeinsparpotential durch Eco-Driving kann mehr als 20% betragen. Langfristig ist durch Eco-Feedback und Trainings aber mit einer Einsparung von nur 10% zu rechnen. Dies zeigt, dass bisherige Eco-Feedback-Assistenten oder Fahrertrainings nicht das volle Potential von Eco-Driving im täglichen Gebrauch fördern können. Im Rahmen meiner Dissertation möchte ich daher weitere ergänzende Möglichkeiten zur Unterstützung eines energieeffizienten Längsführungs-Fahrverhaltens im Elektroauto untersuchen, über die bisher in der Literatur nur vereinzelt berichtet wird beziehungsweise die nicht oder nicht ausreichend im Kontext Eco-Driving systematisch evaluiert und diskutiert werden. Diese stehen in Abgrenzung zu rein komponentenbasierten fahrzeugseitigen Ansätzen, wie die Optimierung der Batteriekapazität, oder visuellen Eco-Assistenten und Trainings und werden im Folgenden vorgestellt.

1.2.2 Veränderung von Pedal- und Motorkennlinien

Die besondere Charakteristik von Elektrofahrzeugen und die damit verbundenen Freiheitsgrade erlauben es vielversprechende Veränderungen vorzunehmen: Es handelt sich hierbei um Veränderungen von Pedal- und Motorkennlinien. Ein Vorteil, der im Folgenden beschriebenen Ansätze liegt darin, dass sie ohne die Notwendigkeit eines vorhergehenden Coachings oder einer dauerhaften Motivation wirksam sein können. Weiterhin bieten derartige Veränderung die Möglichkeit verschiedene Verhaltensweisen, die Eco-Driving kennzeichnen, also Beschleunigungs-, Verzögerungs- oder Geschwindigkeitsverhalten (eventuell sogar gleichzeitig), zu fördern. Inwiefern dies zugleich effektiv wie akzeptabel gelingt, ist Thema meiner Arbeit.

Der erste Ansatz, den ich untersucht habe, ist eine veränderte Mensch-Maschine-Schnittstelle im Bereich der Pedalerie, die es ermöglicht mit nur einem Pedal zu beschleunigen und zu verzögern. Hierdurch wird die sogenannte Pedalkennlinie, im Detail der funktionale Zusammenhang von Pedalstellung und angefordertem Motormoment, verändert. Dies ist ein vielversprechender Ansatz, um energieineffizientem (hydraulischem) Bremsen entgegenzuwirken. Bisherige vergleichbare Veränderungen der Pedalerie sind verstärkt im Bereich der Fahrsicherheit und eher unzureichend im Kontext Eco-Driving untersucht worden. Daher habe ich diese Maßnahme zur Förderung eines energieeffizienten Verzögerungsverhaltens wissenschaftlich validiert und darüber hinaus evaluiert, wie eine solche Schnittstelle, insbesondere die maximale Rekuperation, gestaltet sein sollte, um maximal wirksam und akzeptabel zu sein.

Der zweite Ansatz, den ich untersucht habe, besteht darin, das maximale Drehmoment und die maximale Leistung elektronisch zu verändern beziehungsweise zu limitieren. Vielversprechend ist dieser Ansatz, da Drehmoment und Leistung eng mit der Beschleunigung eines Fahrzeuges zusammenhängen und deren Limitierung somit diesen

Aspekt von Eco-Driving fördern könnte. Da auch für diese Maßnahme in der wissenschaftlichen Literatur Studien fehlen, die untersuchen, welche Veränderungen der Motorkennlinien am wirksamsten und gleichzeitig am akzeptabelsten die verschiedenen Eco-Driving Aspekte beeinflussen können, soll mit meiner Dissertation diese Wissenslücke geschlossen werden.

Der dritte Ansatz, den ich untersucht habe, ist ein aktives Beschleunigungspedal, welches eine Veränderung der Pedalkennlinie, die den funktionalen Zusammenhang von Pedalstellung und -gegenkraft beschreibt, darstellt. Auf diese Weise kann einerseits auf ineffizientes Verhalten aufmerksam gemacht werden und andererseits effizientes Fahrverhalten angeleitet werden, indem es die optimale Pedalstellung „anzeigt“. Vielversprechend an diesem Ansatz ist, dass fast alle Eco-Driving-Fahrverhaltensbereiche angesprochen werden können: Beschleunigungs-, Verzögerungs-, und Geschwindigkeitsverhalten oder vorausschauendes Fahren. Darüber hinaus ist es möglich, energieoptimales Rekuperieren anzuleiten oder zu verbessern. Ein aktives Beschleunigungspedal ist bereits in ICEVs implementiert und evaluiert worden, allerdings fehlen elektroautospezifische Studien. Daher habe ich untersucht, inwiefern Eco-Driving unter Berücksichtigung elektrofahrzeugspezifischer Aspekte im Elektroauto gefördert werden kann.

1.3 STRUKTUR DER ARBEIT

Die Arbeit ist in einen theoretischen und einen empirischen Teil sowie die abschließende Diskussion gegliedert. Als Ausgangspunkt des theoretischen Teiles dienen zunächst eine Definition von Eco-Driving sowie eine Beschreibung der Eigenschaften von Elektroautos, die für die vorliegende Arbeit relevant sind. Anschließend erläutere ich die Veränderungen von Pedal- und Motorkennlinien, die ich angepasst und untersucht habe. Ferner diskutiere ich, wie deren Effektivität und Akzeptanz sich gegenseitig bedingen und welche Faktoren für deren Gestaltung aber auch Bewertung zu berücksichtigen sind. Im Anschluss diskutiere ich die Veränderung von Pedal- und Motorkennlinien vor dem Hintergrund der Informationsverarbeitung und kognitiver Ressourcen. Dies soll verdeutlichen, warum die Suche nach alternativen oder ergänzenden Möglichkeiten, Eco-Driving zu fördern, zudem sinnvoll ist und welche Vorteile sich aus diesen ergeben können.

Der empirische Teil der Arbeit umfasst vier Studien, die zum Teil aufeinander aufbauen. Zu jeder Studie fasse ich zunächst den Stand der Forschung und weitere relevante Literatur zusammen. In Studie I habe ich untersucht, ob es effektiver und akzeptabler ist, wenn mit dem Beschleunigungspedal statt mit dem Bremspedal rekuperiert wird. In Studie II evaluierte ich verschiedene Stärken der rekuperativen Bremse bei der Pedalvariante, die mit dem Beschleunigungspedal rekuperiert. In Studie III untersuchte ich, welche Motorkennlinien wirksam und akzeptabel sind. Variiert wurde die Limitierung des maximalen Drehmoments oder der maximalen Leistung. Schließlich habe ich in Studie IV einen optimierten Limitierungsansatz (aufbauend auf den Erkenntnissen der dritten Studie) konzipiert und diesen mit zwei Varianten eines aktiven Beschleunigungspedals verglichen. Im vierten Teil der Arbeit, fasse ich die Ergebnisse zusammen, leite Gestaltungsempfehlungen ab und diskutiere den weiteren Forschungsbedarf.

2 THEORETISCHER TEIL

2.1 ECO-DRIVING

Im folgenden Kapitel erläutere ich den Begriff Eco-Driving, die verschiedenen Ebenen, auf denen Eco-Driving gefördert werden kann, und grenze die Definition für die vorliegende Arbeit ein. Darüber hinaus beschreibe ich Eco-Driving-Regeln, die speziell im Elektrofahrzeug relevant sind.

2.1.1 Definition

Unter Eco-Driving versteht man ein verbrauchsarmes und somit energieeffizientes Fahrverhalten. In der Literatur wird die Definition von Eco-Driving manchmal enger und manchmal weiter gefasst (Barkenbus, 2010). Die Beschreibung der Fahraufgabe nach Michon (1985), welche in die drei im Folgenden aufgeführten hierarchischen Ebenen gegliedert werden kann, soll dies verdeutlichen:

1. die strategische Ebene: Strategie- und Navigationsaufgaben,
2. die taktische Ebene: Bahnführungs- und Manövrieraufgaben und
3. die operationale Ebene: Stabilisierungs- und Kontrollaufgaben.

Auf der strategischen Ebene werden Entscheidungen getroffen, die fahrtübergreifend sind. Der Fahrer muss bestimmen, zu welcher Uhrzeit gefahren wird, welche Strecke er wählt oder wann und wie viele Pausen er einplant. Zumeist werden Entscheidungen auf strategischer Ebene vor Fahrtantritt festgelegt. Auf der taktischen Ebene werden bewusste Entscheidungen während der Fahrt getroffen, denen im Gegensatz zur operationalen Ebene keine Automatismen zugrunde liegen. Hierzu zählen beispielsweise die bewusste Wahl einer Geschwindigkeit, die Entscheidung über Überhol- und Abbiegevorgänge oder die Beachtung von Verkehrsregeln. Die operationale Ebene der Fahraufgabe umfasst die Längs- sowie Querregelung des Fahrzeugs. Auf dieser Ebene beschleunigt, bremst und lenkt der Fahrer und die Handlungen erfolgen unbewusst und automatisiert. Wenn unter Eco-Driving auch ein energieeffizientes Fahrverhalten auf strategischer Ebene verstanden wird, dann handelt es sich tendenziell um eine weitere Definition von Eco-Driving, während Eco-Driving auf taktischer und operationaler Ebene den Begriff im engeren Sinne beschreibt. Die Ansätze, die ich in dieser Arbeit untersuche, sollen den Fahrer auf der taktischen und auf der operationalen Ebene der Fahraufgabe beim Eco-Driving unterstützen und weniger die strategische Ebene der Fahraufgabe beeinflussen.

Auf der taktischen Ebene soll der Fahrer dabei unterstützt werden, bewusste Entscheidungen energieoptimaler zu gestalten. Hierzu zählt zum einen die Geschwindigkeitswahl. Je genauer sich der Fahrer an die jeweilige Geschwindigkeitsbegrenzung hält desto günstiger ist seine Energiebilanz. Weiterhin soll der Fahrer dabei unterstützt werden, vorausschauender zu fahren. Er soll unnötige Bremsungen oder Beschleunigungen vermeiden. Hierzu kann ihm beispielsweise ein energieoptimaler Bremszeitpunkt, um an einer Kreuzung zum Stehen zu kommen, angezeigt werden. Auf der operationalen Ebene soll insbesondere gemäßigt Beschleunigen gefördert werden.

2.1.2 Regeln

In dieser Arbeit wird Eco-Driving im engeren Sinne verstanden. Die gängigen Eco-Driving-Regeln (ADAC e.V., 2013) für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren auf operationaler und taktischer Ebene sind hierbei:

1. Vorausschauendes Fahren, um starkes Beschleunigen und starkes Verzögern zu vermeiden
2. Geschwindigkeiten konstant halten und dies bei niedriger Drehzahl
3. Sich an vorgegebene Geschwindigkeiten halten
4. Frühes Schalten in einen hohen Gang
5. Moderat (aber nicht zu stark) auf die Zielgeschwindigkeit beschleunigen, da der Wirkungsgrad von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor am höchsten bei höheren Geschwindigkeiten mit niedriger Drehzahl ist
6. Bewusster Umgang mit weiteren Energieverbrauchern im Fahrzeug, wie beispielsweise der Klimaanlage oder Sitzheizung.

Die oben aufgeführten Spritsparregeln gelten für ICEVs gleichermaßen wie für Elektrofahrzeuge, denn die physikalischen Gesetze bleiben dieselben: Je schneller ein Fahrzeug fährt und je schneller ein Fahrzeug beschleunigt, desto mehr Energie braucht es. In Gänze auf Elektrofahrzeuge übertragbar sind die Regeln allerdings nicht. So entfallen diese beispielsweise zur energieeffizienten Gangschaltung und es müssen weitere Regeln ergänzt werden (vgl. hierzu Kapitel 2.2 „Das Elektroauto“):

1. Möglichst auf die hydraulische Bremse verzichten und stattdessen durch Rekuperation verzögern
2. Segeln, um vorausschauendes Fahren zu fördern.

2.2 DAS ELEKTROAUTO

In den folgenden Kapiteln erläutere ich die Eigenschaften von Elektroautos, die für die vorliegende Arbeit und für Eco-Driving im Elektrofahrzeug relevant sind und als Grundlage für die nachfolgenden Ansätze zur Optimierung eines energieeffizienten Fahrverhaltens dienen.

2.2.1 Elektromotor vs. Verbrennungsmotor

Elektroautos haben ähnlich wie Motorräder ab der ersten Sekunde die volle Zugkraft. Das liegt, wie in Abbildung 2 links dargestellt, an dem hohen Drehmoment bei niedriger Drehzahl. Die maximale Leistung wird hier bei relativ niedriger Drehzahl erreicht und nimmt dann nach mehr oder weniger langem (fahrzeugabhängigem) Spitzenwert ab. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (Ottomotor) bauen das Drehmoment erst langsam auf und erreichen die höchste Leistung im Vergleich zum Elektroauto erst bei relativ hoher Drehzahl (vgl. Abbildung 2 rechts). Elektromotoren haben darüber hinaus keine Schaltung beziehungsweise kein Getriebe.

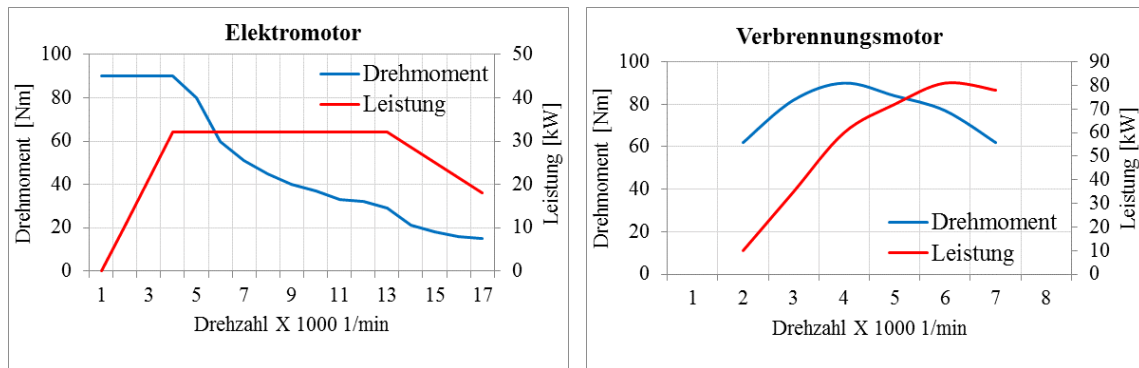


Abbildung 2: Beispielhafte Motorkennlinien eines Elektromotors (links) und eines Verbrennungsmotors (Ottomotor; rechts). Dargestellt ist jeweils der Zusammenhang von Drehzahl, Drehmoment und Leistung. Abbildungen angepasst nach Hondaoldies (k.A.)

Der Energieverbrauch eines Fahrzeuges steht in engem Zusammenhang mit dem anliegenden Drehmoment, denn dieses ist maßgeblich dafür verantwortlich, wie stark ein Fahrzeug beschleunigt. Mit Elektrofahrzeugen ist es hierbei im Gegensatz zu ICEVs energieeffizienter tendenziell schwächer und somit langsamer auf die Zielgeschwindigkeit zu beschleunigen (Rittger, 2012).

2.2.2 Regeneratives vs. hydraulisches Bremsen

Elektromotoren verbrauchen nicht nur Strom, sondern können auch Strom erzeugen, der in die Batterie zurückgeführt werden kann; Elektroautos können also ihre Batterie ohne externe Stromzuführung zum Teil selbstständig wieder aufladen. Dies kann den Gesamtverbrauch während einer Fahrt deutlich reduzieren (Clarke, Muneer, & Cullinane, 2010). Sobald das Fahrzeug beispielsweise bergab rollt, können die sich drehenden Räder, ähnlich wie bei einem Dynamo, dazu genutzt werden, Energie zu produzieren. Die Motoren werden in diesem Fall zu Generatoren und rekuperieren² Energie. Durch die Stromerzeugung entsteht ein Widerstand, der als Bremskraft genutzt werden kann, und der Verzögerungen, die bis zu einem Fünftel derjenigen von Trommel- oder Scheibenbremsen entsprechen, aufbaut. Man bezeichnet diesen Vorgang als regeneratives Bremsen (nachfolgend auch rekuperative Bremse genannt). Neben der rekuperativen Bremse besitzt jedes Elektroauto auch eine hydraulische Bremse (herkömmliche Trommel- oder Scheibenbremse), welche deutlich stärkere Verzögerungen als die rekuperative Bremse erzeugen kann und daher allein aus Gründen der Sicherheit unverzichtbar bleibt. Die hydraulische Bremse funktioniert dabei parallel und somit gleichzeitig mit der rekuperativen Bremsen, führt aber dazu, dass der Zeitraum, in dem regenerativ gebremst wird, durch die starke Verzögerung deutlich verkürzt wird. Dies wird besonders relevant unter dem Gesichtspunkt, dass die Rekuperationsleistung sich nur bei hohen Geschwindigkeiten maximal entfalten kann. Abbildung 3 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Dargestellt ist ein Verzögerungsvorgang von 100 km/h auf 0 km/h, der ohne Hinzunahme der hydraulischen Bremse erfolgt; es handelt sich also um rein regeneratives Bremsen. Ein positiver Leistungswert bedeutet, dass Energie produziert wird, die in die Batterie eingespeist wird. Mit abnehmender Geschwindigkeit nimmt auch die

² Rekuperieren von dem lateinischen „recuperare“ = wiedergewinnen.

Rekuperationsleistung ab. Ab etwa 15-20 km/h kann aus technischen Gründen de facto wenig bis hin zu gar keiner Energie mehr in die Batterie rückgespeist werden.

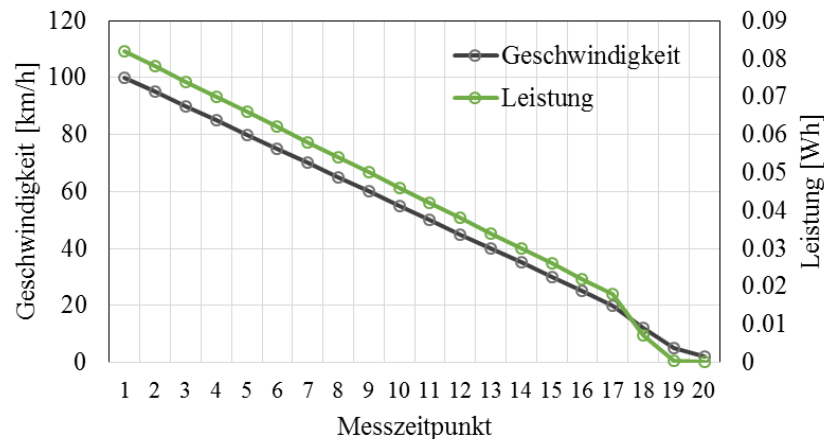


Abbildung 3: Beispielhafte vereinfachte Darstellung der Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Rekuperationsleistung bei einem Verzögerungsvorgang von 100 auf 0 km/h mittels regenerativem Bremsen mit dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Elektroautomodell. Positive Leistung bedeutet Leistungsüberschuss, der in die Batterie zurückgespeist wird.

Elektrofahrzeuge können auch in einem Zustand dahingleiten, der Segeln genannt wird und in dem der Batterie weder Energie zugeführt noch entnommen wird. Das Elektroauto wird während des Segelns nur durch Wind- und Rollwiderstände gebremst. Beispielweise beim Annähern an rote Ampeln, von denen man erwartet, dass diese zeitnah umspringen, kann gesegelt werden, um nachfolgende Beschleunigungen so gering wie möglich zu halten. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass die Energie, die beispielsweise bei einem Verzögerungsvorgang von 50 km/h zum Stillstand rekuperiert wird, nicht ausreicht, um ein Fahrzeug aus dem Stillstand auf 50 km/h zu beschleunigen. Einer Verzögerung (selbst wenn sie durch Rekuperation erfolgt) ist folglich aus energetischer Sicht immer keine Verzögerung oder wenigstens Segeln vorzuziehen. Weiterführende Literatur zu Elektromotoren und deren Funktionsweise bieten beispielsweise Kremser (2007) oder Wallentowitz und Freialdenhoven (2011).

2.3 PEDAL- UND MOTORKENNLINIEN

Das Wissen, welches in Eco-Driving-Fahrertrainings erworben wird, kann aus Gründen des Vergessens oder aus Gründen der Motivation nicht langfristig in vollem Maße umgesetzt werden. Visuelle Eco-Assistenten, die diesem Problem zum Teil erfolgreich begegnen, haben darüber hinaus den Vorteil, dass sie unterschiedliche Fahrverhaltensweisen, die Eco-Driving kennzeichnen, direkt während der Fahrt ansprechen können. Von Nachteil ist allerdings, dass sie den Fahrer von der Fahraufgabe ablenken können, wie in Kapitel 2.5 „Kognitive Prozesse“ diskutiert wird. Und schließlich schöpfen auch diese nicht das gesamte Eco-Driving-Potential aus, weswegen ich in der vorliegenden Arbeit weitere Ansätze untersuche, die ergänzend zu Fahrertrainings und visuellen Eco-Assistenten wirksam sein könnten. Hierbei handelt es sich um folgende drei Anpassungen:

1. die Implementierung einer neuen Schnittstelle, nämlich eines kombinierten Fahrbremspedals
2. die Bereitstellung eines Eco-Modus durch Limitierung von Drehmoment oder Leistung und
3. die Implementierung eines aktiven Beschleunigungspedals.

Diese Ansätze sind deshalb so interessant, weil sie ebenfalls direkt während der Fahrt wirksam sein können und womöglich weniger ablenkend und beanspruchend sind als visuelle Eco-Assistenten. Darüber hinaus könnten sie miteinander kombiniert werden und auf diese Weise ebenfalls verschiedene Eco-Driving-Teilbereiche fördern. Die Veränderung von Pedal- und Motorkennlinien können ohne zwingendes Bewusstsein des Fahrers wirksam werden, wie ich in Kapitel 2.4.2 „Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ diskutiere. Das hätte wiederum den Vorteil, dass der Fahrer nicht zusätzlich motiviert werden müsste und somit auch langfristige Effekte möglich wären.

Die Ansätze ergeben sich zum Teil aus der besonderen Charakteristik von Elektrofahrzeugen und wurden bisher noch nicht ausreichend im Kontext Eco-Driving oder im Elektrofahrzeug untersucht oder generell wissenschaftlich validiert und zwar die Effektivität und Akzeptanz gleichermaßen berücksichtigend. Dies beschreibe ich in den jeweiligen einleitenden Kapiteln der Studien im empirischen Teil der Arbeit. Im Folgenden erläutere ich die Ansätze näher und zeige auf, zur Förderung welche Eco-Driving-Aspekte sie besonders geeignet sein könnten.

2.3.1 Kombiniertes Fahrbremspedal

Als erstes evaluierte ich die Veränderung der Pedalkennlinie des Beschleunigungspedals, welche den funktionalen Zusammenhang von Pedalstellung und angefordertem Drehmoment beschreibt. In Abbildung 4 sind beispielhaft zwei Kennlinien abgebildet, welche die Veränderung verdeutlichen sollen. Dargestellt ist zum einen eine vereinfachte Pedalkennlinie eines gängigen Beschleunigungspedals. Diese zeigt, dass mit zunehmender Pedalstellung ein höheres positives Drehmoment angefordert wird. In dem Beispiel aus Abbildung 4 wird mit einem kombinierten Fahrbremspedal ab einer Pedalstellung von weniger als 30 % ein negatives Drehmoment angefordert. Auf diese Weise wird rekuperiert und die Batterie aufgeladen (sofern sich das Fahrzeug nicht im Stillstand befindet).

Prinzipiell ist es auf diese Weise möglich, mit nur einem Pedal zu beschleunigen und zu verzögern. Vor dem Hintergrund einer energieeffizienten Fahrweise, insbesondere im Elektrofahrzeug (vgl. Kapitel 2.1.2 „Regeln“), ist dies sinnvoll, weil Fahrer dadurch seltener oder sogar gar nicht mehr hydraulisch bremsen müssten. Ob es tatsächlich gelingt, energieoptimales Verzögerungsverhalten und weitere Aspekte von Eco-Driving mit Hilfe eines solchen Pedals zu fördern, untersuche ich zunächst in Studie I (Kapitel 3.2 „Studie I: Das kombinierte Fahrbremspedal“). Darüber hinaus evaluiere ich in Studie II (vgl. Kapitel 3.3 „Studie II: Die Stärke der rekuperativen Bremse“), wie stark die Rekuperation eines kombinierten Fahrbremspedals maximal sein sollte, um Eco-Driving gleichzeitig effektiv und akzeptabel zu fördern. Es gibt sowohl Gründe, die für eine tendenziell schwächere aber auch für eine tendenziell stärkere Rekuperation sprechen, wie ich in Kapitel 2.4.2 „Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ diskutiere.

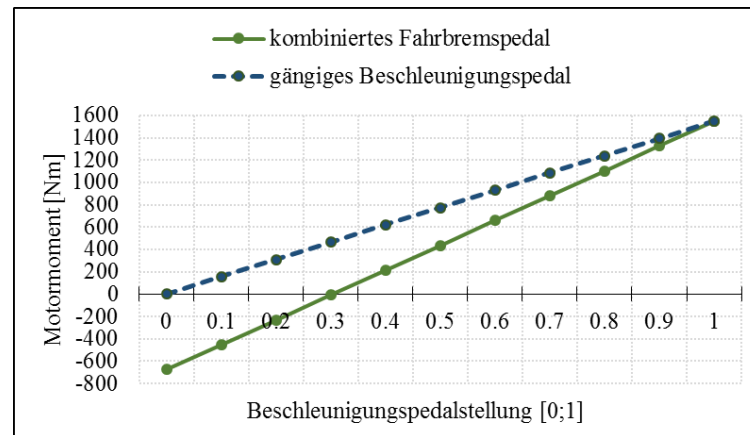


Abbildung 4: Pedalkennlinien, die den funktionalen Zusammenhang von Pedalstellung und angefordertem Drehmoment für ein gängiges Beschleunigungspedal und für ein kombiniertes Fahrbremspedal beispielhaft zeigen.

2.3.2 Limitierungsansatz

Der Energieverbrauch eines Fahrzeuges steht in proportionalem Zusammenhang zum Drehmoment am Rad, das auf die Straße gebracht wird. Das anliegende Drehmoment trägt wiederum maßgeblich zur Beschleunigung des Fahrzeuges bei. Daher ist eine der wichtigsten Eco-Driving-Regeln moderat zu beschleunigen. Aufgrund der Beschaffenheit von Elektromotoren ist es in Elektrofahrzeugen möglich, auf zweifache Weise Einfluss auf das Drehmoment zu nehmen. Zum einen kann das maximal anforderbare Drehmoment direkt limitiert werden, zum anderen kann die maximale Leistung reduziert werden, welche wiederum beeinflusst, wie lange ein bestimmtes Drehmoment abrufbar ist. Auf diese Weise werden die Motorkennlinien angepasst. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 5 dargestellt. Links dargestellt ist der Effekt einer stufenweisen Limitierung des maximal abrufbaren Drehmoments: Die Limitierung führt dazu, dass bei geringen Geschwindigkeiten weniger Drehmoment abrufbar ist und daher das Fahrzeug bei geringen Geschwindigkeiten weniger stark beschleunigen kann. Mit steigender Geschwindigkeit nähern sich die Kurven zunehmend an. Das bedeutet, dass je nach Stärke der Limitierung ab einer bestimmten Geschwindigkeit das Beschleunigungsverhalten des limitierten Fahrzeuges vergleichbar mit einem unlimitierten Fahrzeug ist. Die rechte Seite der Abbildung zeigt, wie sich eine stufenweise Limitierung der maximalen Leistung auf das Drehmoment auswirken kann. Zwar kann trotz limitierter Leistung das Fahrzeug weiterhin bei geringer Geschwindigkeit maximal beschleunigen, allerdings kann diese Beschleunigung mit zunehmender Limitierung weniger lang beibehalten werden. Mit steigender Geschwindigkeit nimmt also das Beschleunigungsvermögen ab.

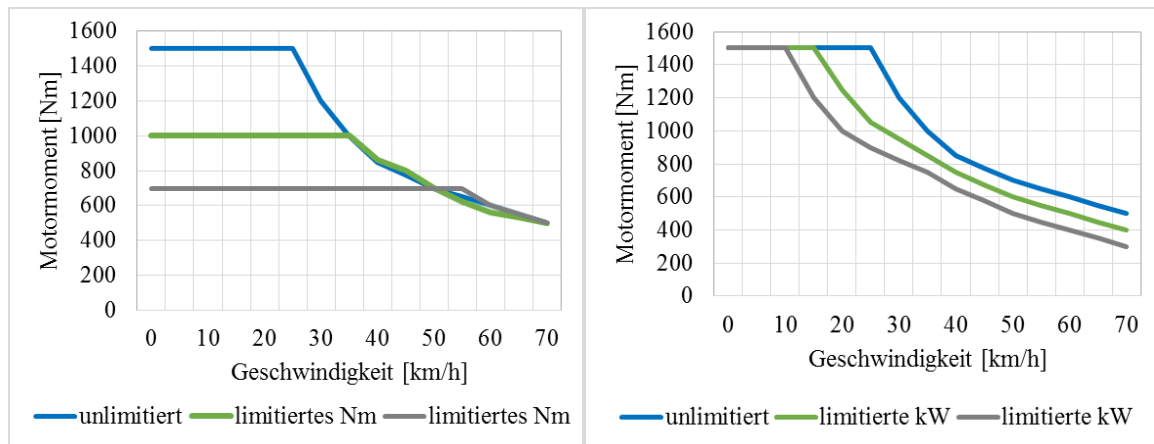


Abbildung 5: Beispielhafte Motorkennlinien, die den Zusammenhang von anforderbaren Drehmomenten und Geschwindigkeit beschreiben. Links: Veränderung des abrufbaren Drehmoments bei stufenweiser Limitierung des maximalen Drehmoments. Rechts: Veränderung des abrufbaren Drehmoments bei stufenweiser Limitierung der maximalen Leistung.

Das maximale Drehmoment und die maximale Leistung können prinzipiell per Knopfdruck unabhängig voneinander oder aber gleichzeitig verändert werden. Wie aus der vorhergehenden Beschreibung deutlich wird, bewirkt die Limitierung der Leistung ein anderes Fahrzeugverhalten als die Limitierung des Drehmoments. Inwiefern nun welche Art der Limitierung zum einen in Hinblick auf den Energieverbrauch, aber auch hinsichtlich der Akzeptanz des Fahrers zu bevorzugen ist, ist bisher noch nicht experimentell untersucht worden. Ziel der Studien III und IV ist es daher, die Wirksamkeit und Akzeptanz eines Limitierungsansatzes zur Vermeidung starker Beschleunigungen zu untersuchen sowie eine optimale Parametrisierung zu finden (vgl. Kapitel 3.4 „Studie III: Limitierung von Leistung und Drehmoment“ und Kapitel 3.5 „Studie IV: Das aktive Beschleunigungspedal“). Darüber hinaus untersuche ich, welche weiteren Eco-Driving-Aspekte auf diese Weise optimiert werden können.

2.3.3 Aktives Beschleunigungspedal

Durch die Limitierung von Drehmoment und Leistung sollen starke Beschleunigungen abgeschwächt werden. Mit Hilfe eines aktiven Beschleunigungspedals (Active Accelerator Pedal; AAP) ist dies ebenfalls möglich. Abbildung 6 zeigt beispielhaft eine lineare und eine angepasste Pedalkennlinie. Die angepasste Kennlinie erzeugt einen vergleichsweise höheren Widerstand (Pedalgegenkraft) bei bereits geringeren Pedalstellungen und soll dadurch den Fahrer daran hindern, eine höhere Pedalstellung zu wählen und somit ein höheres Drehmoment anzufordern. Von Vorteil ist zudem, dass dem Fahrer weiterhin das maximale Drehmoment und die maximale Leistung zur Verfügung stehen. Wie ich in Kapitel 3.5.1 „Aktueller Forschungsstand zum aktiven Beschleunigungspedal“ zusammenfassend darstelle, hat ein aktives Beschleunigungspedal noch weitere Vorteile gegenüber dem Limitierungsansatz, denn es kann ferner Einfluss auf das Geschwindigkeits-, oder Abstandsverhalten nehmen. Und auch eine energieoptimale Rekuperation könnte sich theoretisch mit Hilfe von aufgeschalteten Widerständen fördern lassen. Hierzu gibt es allerdings bisher keine empirisch fundierten Veröffentlichungen. In

Studie IV evaluiere ich daher die Wirksamkeit eines aktiven Beschleunigungspedals zur Förderung diverser Eco-Driving-Aspekte, insbesondere auch EV-spezifischer. Darüber hinaus vergleiche ich den Limitierungsansatz mit dem aktiven Beschleunigungspedal, um zu bestimmen, welcher Ansatz zu bevorzugen ist (vgl. Kapitel 3.5 „Studie IV: Das aktive Beschleunigungspedal“).

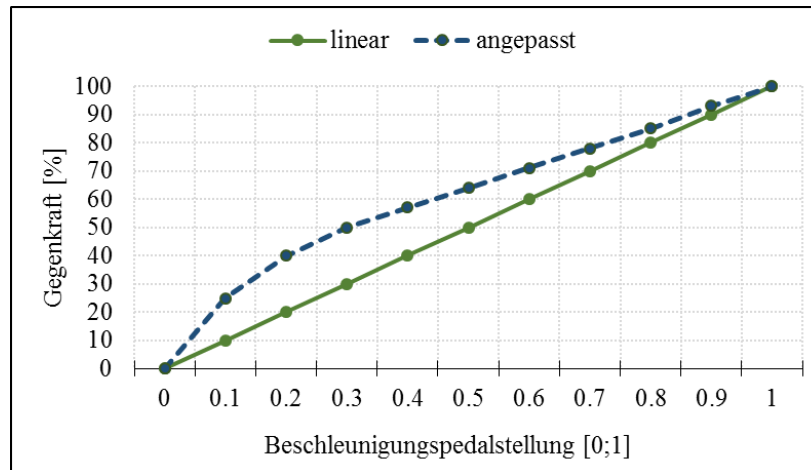


Abbildung 6: Darstellung einer linearen und beispielhaft angepassten Pedalkennlinie, die den funktionalen Zusammenhang von Pedalstellung und Gegenkraft aufzeigt.

Abbildung 6 zeigt hierbei nur eine von mehreren Möglichkeiten, ein aktives Beschleunigungspedal zu programmieren. Es kann unter verschiedenen Bedingungen Widerstände aktivieren oder vibrieren: Abhängig vom Fahrer-Input (beispielsweise der gewählten Pedalstellung), abhängig von Fahrzeuggrößen (beispielsweise vom angefordertem Drehmoment oder der aktuellen Leistung) oder abhängig von situationsspezifischen Informationen (beispielsweise aktuellen Geschwindigkeitsbegrenzungen). Wie ich in Kapitel 3.5.1 „Aktueller Forschungsstand zum aktiven Beschleunigungspedal“ darstelle, sind die Befunde dazu, welche Art der Programmierung zu bevorzugen ist, unzureichend, weswegen ich zwei Varianten eines aktiven Beschleunigungspedals konzipiere und diese in Studie IV miteinander vergleiche.

2.4 AKZEPTANZ UND EFFEKTIVITÄT

Die Ansätze, die ich in dieser Arbeit untersuche, sollen auf der einen Seite effektiv und auf der anderen Seite akzeptabel sein, um zu gewährleisten, dass Fahrer derartige Maßnahmen in ihren Fahrzeugen implementiert haben wollen und gerne nutzen. Eines der bekanntesten und meist untersuchten Modelle, die erklären unter welchen Bedingungen neue Technologien von Anwendern akzeptiert werden (Gunnesch-Luca, 2016), ist das Technologieakzeptanzmodell (engl. Technology Acceptance Model) nach Davis (1985). Das Modell beschreibt, von welchen Faktoren es maßgeblich abhängt, ob, wann und wie oft ein neues System (bzw. eine neue Technologie) genutzt wird (siehe Abbildung 7). Die zwei zentralen Faktoren, die Einfluss auf die Einstellung ein System zu nutzen ausüben, sind dabei einerseits der wahrgenommene Nutzen („Perceived Usefulness“) eines Systems und zum anderen die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (Einfachheit, das System zu nutzen; „Perceived Ease of Use“).

Das Modell ist deshalb für die Bewertung der Akzeptanz hilfreich, weil Verbesserungen der jeweiligen Technologie abgeleitet werden können: Wird ein System als nützlich, aber nicht als benutzerfreundlich wahrgenommen, so sollte beispielsweise die Bedienschnittstelle optimiert werden. Wird die Benutzerfreundlichkeit positiv bewertet, aber nur ein geringer Nutzen wahrgenommen, so ist zu überlegen, wie dem Fahrer der Nutzen, sofern er denn objektiv vorhanden ist, verdeutlicht werden kann (beispielsweise über eine Anzeige). In der vorliegenden Arbeit werde ich daher für die Beurteilung der Akzeptanz des kombinierten Fahrbremspedals, des Limitierungsansatzes und des aktiven Beschleunigungspedals beide Faktoren abfragen und gegebenenfalls Optimierungsbedarf ableiten.

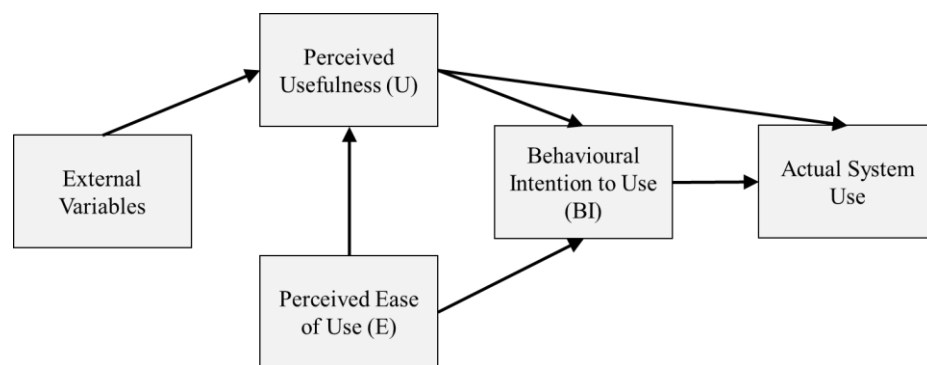


Abbildung 7: *Technology Acceptance Model*. Abbildung angepasst nach Venkatesh und Davis (2000).

In den folgenden beiden Kapiteln, diskutiere ich die beiden Faktoren „wahrgenommener Nutzen“ und „wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“ ausführlicher. Hierbei soll in Zusammenhang mit dem wahrgenommenen Nutzen verdeutlicht werden, warum zum einen im Alltag erlebte Beschleunigungen und Verzögerung bei der Gestaltung der Kennkurven und zum anderen der Fahrstil bei der Auswertung und Interpretation der Befunde mitberücksichtigt werden sollte. Weiterhin stelle ich in Zusammenhang mit der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit dar, inwiefern eine Adaptation und somit ein Erlernen des Umgangs mit den vorgenommenen Veränderungen rein objektiv möglich ist und welche Rückschlüsse auf die Akzeptanz gezogen werden können.

2.4.1 Wahrgenommener Nutzen

Im Rahmen einer Erweiterung des Modells sind weitere Variablen ermittelt worden, die signifikanten Einfluss auf die Akzeptanz neuer Technologien haben, indem sie den Faktor „wahrgenommener Nutzen“ beeinflussen. Hierzu zählt unter anderem, inwiefern die Technologie dabei hilft, die Aufgabe zu erfüllen und weiterhin, inwiefern das System objektiv von Nutzen ist, also tatsächlich dabei hilft die Reichweite zu steigern oder Eco-Driving zu fördern (Venkatesh & Davis, 2000). Der objektive Nutzen kann dem Benutzer hierbei in Form von Anzeigen verdeutlicht werden. Wie ich in Kapitel 2.5 „Kognitive Prozesse“ aber darstelle, sollte die visuelle Ablenkung von Fahrern möglichst nicht weiter gesteigert werden, weshalb in den Studien der vorliegenden Arbeit darauf verzichtet wurde, dem Fahrer den objektiven Nutzen visuell anzuzeigen.

Die Variable, wie gut die Technologie dabei hilft die Aufgabe zu erfüllen, diskutiere ich im Folgenden näher. In den vorliegenden Studien ist die Aufgabe des Fahrers die Fahraufgabe, welche, wie bereits weiter oben beschrieben, nach Michon (1985) in Navigations-, Führungs- und Stabilisierungsebene unterteilt werden kann. Um grundsätzlich zu gewährleisten, dass der Fahrer nicht daran gehindert wird, die Fahraufgabe auszuführen und der wahrgenommene Nutzen nicht aus diesem Grund gemindert wird, ist es sinnvoll, die im alltäglichen Gebrauch benötigten Beschleunigungen und Verzögerungen bei der Gestaltung der Maßnahmen zu berücksichtigen. Insbesondere der Limitierungsansatz hat zur Folge, dass in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen keine maximalen Beschleunigungen abgerufen werden können. Aber auch das aktive Beschleunigungspedal soll es dem Fahrer erschweren, bestimmte Beschleunigungen oder Geschwindigkeiten zu erreichen. Daher fasse ich in Kapitel 3.3 „Studie II: Die Stärke der rekuperativen Bremse“ und in Kapitel 3.4 „Studie III: Limitierung von Leistung und Drehmoment“ den Erfahrungsbereich von Beschleunigungen und Verzögerungen zusammen und berücksichtige diese bei der Gestaltung der jeweiligen Kennlinie.

Weiterhin erwarte ich Wechselwirkungen des Fahrstils mit den Variablen „Hilft bei Erfüllung der Aufgabe“ und „objektiver Nutzen“ (siehe Abbildung 8). Insbesondere das Fahrverhalten auf der Führungsebene wird unter anderem vom individuellen Fahrstil des jeweiligen Fahrers bedingt. Der Fahrstil ist hierbei abhängig von langfristigen, fahrtspezifischen oder auch situativen sowie motivationalen und kognitiven Bedingungen (Gstalter, 2000). So führen beispielsweise der Wunsch nach Fahrspaß oder Zeitdruck zu bewusst gewählten starken Längs- und Querschleunigungen und hohen Geschwindigkeiten. Fahrer mit einem starken Sicherheitsbedürfnis werden sich beispielsweise an stark befahrenen Kreuzungen ebenfalls starke Beschleunigungen wünschen, ansonsten aber bewusst geringere Geschwindigkeiten wählen.

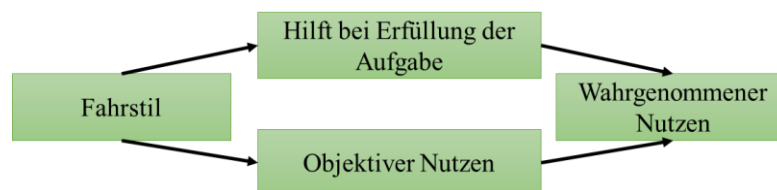


Abbildung 8: Einflussfaktoren auf den wahrgenommenen Nutzen eines Systems.

Da effizientes Fahren mit entspanntem Fahren vergleichbar ist (siehe hierzu Tomaszewski, 2011 weiter unten), könnten Fahrer mit entspanntem Fahrstil die Optimierungsmaßnahme als positiv bewerten, da sie den bevorzugten Fahrstil der Fahrer unterstützten. Die Maßnahme würde ihnen also dabei helfen die Fahraufgabe nach ihren Vorstellungen zu erfüllen. Fraglich ist allerdings, ob für eben diese Fahrer eine solche Maßnahme auch wirksam ist oder aufgrund der ohnehin entspannten Fahrweise bereits sehr effizient gefahren wird. Der objektive Nutzen wäre also gering, während der wahrgenommene Nutzen möglicherweise hoch ist. Weiterhin ist es möglich, dass sportliche Fahrer die jeweiligen Maßnahmen kompensieren wollen, um weiterhin einen sportlichen Fahrstil zu erreichen. Sportliche Fahrer könnten ein effizienzsteigerndes System ablehnen, weil es sie daran hindern könnte die Fahraufgabe nach ihrem Wunsch auszuführen. Möglicherweise

verschlechtert sich sogar die Energiebilanz von sportlichen Fahrern durch Überkompensation.

Für die Bewertung der Effektivität und Akzeptanz einer Maßnahme kann es daher sinnvoll sein, die Stichprobe in Fahrertypen einzuteilen und etwaige Wechselwirkungen diesbezüglich zu analysieren. Eine Einteilung des Längsführungsfahrstils in drei Kategorien (sportlich, normal, vorsichtig) wird hierbei als ausreichend bewertet (König, Weiß, & Mayser, 2002). In einer Simulatorstudie, der ähnliche wie in der vorliegenden Arbeit verwendete Fahrscenarien zu Grunde lagen, wurden Fahrer entsprechend dieser drei Kategorien instruiert (Tomaszewski, 2011). Die Ergebnisse zeigen zwar, dass sich mit Hilfe einiger Geschwindigkeits- und Beschleunigungsparameter, wie beispielsweise „mittlere Abweichung von der erlaubten Höchstgeschwindigkeit“ oder „mittlere Beschleunigung nach Kreuzungen“ diese drei Fahrstiltypen voneinander unterscheiden lassen. Allerdings war für die Mehrzahl der Situationen und Parameter keine Differenzierung von normalen und vorsichtigen Fahrern möglich.

Da meist nur eine Differenzierung zweier Kategorien bei Tomaszewski (2011) möglich war, werde ich in den folgenden Studien die Fahrer in zwei Kategorien anhand des Längsführungsfahrstils unterteilen (sportliche und normale/vorsichtige Fahrer). Tomaszewski (2011) zeigte in seiner Studie außerdem, dass die Parameter, anhand derer sich die Längsführungsfahrstile abbilden ließen, gleichzeitig diejenigen sind, anhand derer energieeffizientes Fahren gemessen werden kann. Daher verwende ich in der vorliegenden Arbeit die Begriffe analog: Ineffiziente bzw. sportliche Fahrer und effiziente bzw. normale/vorsichtige Fahrer. Die Gruppen werde ich per Mediansplit anhand des Verbrauchsparameters bestimmen und kontrollieren, ob sich die Gruppen in Bezug auf ihr Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten unterscheiden.

2.4.2 Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit

Durch die Veränderung der Position und Stärke der rekuperativen Bremse, der Limitierung von Leistung und Drehmoment sowie der Aktivierung von Widerständen, wird das Verhalten der wichtigsten Bedienschnittstelle zwischen Fahrzeug und Fahrer verändert, nämlich der des Beschleunigungspedals. Der Fahrer muss an diese neuen *motorischen Transformationen* adaptieren. Hat er Schwierigkeiten an derartige motorische Transformationen zu adaptieren, also Schwierigkeiten mit dem Umgang bzw. mit dem Erlernen der Bedienung, so kann die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit und der objektive Nutzen beeinträchtigt werden. Ein Blick in die Grundlagenforschung soll daher zunächst verdeutlichen, an welche neuen motorischen Transformationen der Fahrer adaptieren muss, ob eine Adaptation an derartige Veränderungen grundsätzlich erfolgen kann und welche Erkenntnisse zur Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit ableitbar sind.

Motorische Transformationen. Den kontinuierlichen Übergang von einem proximalen Signal, also der Aktivität von Nervenzellen im Rückenmark oder Gehirn, hin zu einem distalen Signal, also der Ausführung einer Zielbewegung beispielsweise mit der Hand, bezeichnet man als motorische Transformation (Heuer & Jäncke, 2006). Diese kann folgendermaßen definiert werden:

Sammelbegriff für die Übergänge von der efferenten Erregung (Efferenz) zur elektrischen Muskelaktivität und weiter zur Muskelkontraktion (Muskel, Muskeltonus), zum resultierenden Drehmoment am Gelenk, zur Gelenkbewegung, zur Bewegung z.B. der Hand und schließlich der des z.B. Werkzeugs. Für die erfolgreiche Bewegungssteuerung müssen m.T. [motorische Transformation] invertiert werden, d.h., es muss das Muster efferenter Erregung bestimmt werden, das in der gewünschten Trajektorie z.B. der Hand oder des Werkzeugs resultiert. Häufig wird zwischen *dynamischen* und *kinematischen* T. [Transformationen] unterschieden. Erstere betreffen m.T. von Kräften in Bewegungen, Letztere m.T. von Bewegungen (z.B. verschiedener Gelenke des Arms) in Bewegungen (z.B. der Hand, Wirtz & Strohmmer, 2013, p. 1682).

Ein Fahrzeug ist nach dieser Definition als Werkzeug zu verstehen. Vor allem die Querregelung eines Fahrzeuges stellt hierbei eine kinematische und die Längsführung vor allem eine dynamische Werkzeugtransformation dar: Wird das Beschleunigungspedal betätigt, muss in der Regel mit zunehmender Pedalstellung, die ein entsprechend zunehmendes Drehmoment anfordert, eine höhere Kraft auf dem Pedal aufgewendet werden. Die Implementierung eines kombinierten Fahrbremspedals oder einer Limitierung führt zu einer Veränderung der bisher gelernten dynamischen Transformation des Beschleunigungspedals. Für eine vergleichbare Beschleunigung (i.e. Drehmoment am Rad) muss nun eine entsprechend andere Pedalstellung und somit eine andere Kraft am Pedal aufgewendet werden. Gleiches gilt für das aktive Beschleunigungspedal. Im folgenden Kapitel erläutere ich daher, inwiefern Menschen an (neue) dynamische Werkzeugtransformationen adaptieren können.

Adaptation an dynamische Werkzeugtransformationen. Eine Adaptation an Werkzeugtransformationen basiert auf der Bildung neuer oder Erweiterung bestehender innerer Modelle und läuft in aller Regel implizit ab (Heuer & Jäncke, 2006), hervorgerufen durch die Verletzung einer Reaktions-Effekt-Erwartung (Bock, 2001). Daraus entsteht eine Diskordanz, die adaptive Prozesse zur Folge hat (Bock, 2001). Für die Erforschung von Adaptationsprozessen an dynamischen Werkzeugtransformationen werden in der Grundlagenforschung oft aufgeschaltete Kraftfelder benutzt. Hierzu wird zur Erzeugung des Kraftfeldes ein sogenanntes robotisches Manipulandum verwendet (siehe z.B. Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994). Die Kraft kann sich hierbei abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit oder der Position verändern (Thomas, 2010).

Die Kraft bzw. der Widerstand, den ein Fahrer am Beschleunigungspedal spürt und überwinden muss, ist in der Regel positionsabhängig. Dieser Sachverhalt bleibt auch bei

einem kombinierten Fahrbremspedal oder bei aktiver Limitierungen von Drehmoment oder Leistung bestehen. Wird ein aktives Beschleunigungspedal genutzt, so können die zusätzlichen aufgeschalteten Kräfte je nach Programmierung sowohl positionsabhängig als auch geschwindigkeitsabhängig in Erscheinung treten. Studien konnten bestätigen, dass Menschen sowohl an geschwindigkeits- als auch an positionsabhängige Kraftfelder bzw. an Veränderungen dieser Kraftfelder adaptieren können (Krakauer, Ghilardi, & Ghez, 1999; Shadmehr & Brashers-Krug, 1997; Shadmehr & Moussavi, 2000; Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994; Tong & Koller, 2002, zitiert nach Thomas, 2010).

Instabile Reaktions-Effekt-Beziehungen. Bei der Benutzung von Werkzeugen muss eine Kraft, an die es zu adaptieren gilt, nicht immer zu konsistenten Ergebnissen führen. Sie kann auch inkonsistent, instabil bzw. dynamisch sein. Grundlagenstudien bestätigen die Adaptationsfähigkeit an sowohl stabile wie auch dynamische/instabile Kraftfelder (siehe bspw. Flanagan et al., 1999; Franklin, Osu, Burdet, Kawato, & Milner, 2003). Die Effekte der Beschleunigungspedalstellung sind in der Regel dynamisch bzw. instabil, denn die gleiche Pedalstellung (und somit Kraft am Pedal) führt nicht immer zu gleichen Drehmomenten am Motor bzw. am Rad. Je nachdem, wie schnell ein Fahrzeug gerade fährt, wie schwer es beladen ist, ob es bergauf oder bergab fährt, muss die Pedalstellung angepasst werden, um vergleichbare Effekte zu erzielen. Das Einbinden eines kombinierten Fahrbremspedals oder einer Limitierung führt dazu, dass diese zum Teil inkonsistenten Reaktions-Effekt-Beziehungen verstärkt oder abgeschwächt werden: Durch eine Limitierung muss das Pedal beispielsweise noch weiter als gewohnt durchgedrückt werden, um beim Anfahren an einer Steigung stark zu beschleunigen. Ansonsten behalten aber alle umgebenden Faktoren ihre „störende Wirkung“ in vergleichbarer Weise bei. Bei einem aktiven Beschleunigungspedal, das Widerstände abhängig vom Fahrer-Input (also z.B. der Pedalposition) aktiviert, verhält es sich gleich wie mit einem kombinierten Fahrbremspedal oder einer Limitierung. Werden allerdings Widerstände abhängig von Fahrzeug- oder Situationsparametern aktiviert, so kommen neue Störeinflüsse hinzu, an die der Fahrer adaptieren muss. Während Autofahrer die instabile Reaktions-Effekt-Beziehung des Beschleunigungspedals mit der Zeit gelernt und an diese bereits adaptiert haben, ist eine derartige Funktionsweise eines aktiven Beschleunigungspedals neu und daher als komplexer zu bewerten als der Umgang mit einer Limitierung oder dem kombinierten Fahrbremspedal. Ein aktives Beschleunigungspedal könnte daher im Gegensatz zu den anderen Ansätzen als weniger benutzerfreundlich und somit weniger nützlich bewertet werden. Möglicherweise könnte die schwierigere Bedienbarkeit auch negative Auswirkungen auf den objektiven Nutzen und auf die kognitive Beanspruchung (siehe Kapitel 2.5 „Kognitive Prozesse“) haben.

Kraftintensität. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es Hinweise, dass die Intensität der wirkenden Kraft als ein Einflussfaktor auf die Adaptationsgeschwindigkeit zu nennen ist. Beispielsweise konnte Thomas (2010) in einem Experiment, in dem unterschiedliche Corioliskräfte auf ein Manipulandum aufgeschaltet wurden, zeigen, dass eine geringere Kraft zu einem geringeren Initialfehler führte, und die Adaptation an geringere Kraftintensität zu einem schnelleren Erreichen des Adaptationsplateaus beitrug. Weiterhin konnte in einer Studie von Lai, Hodgson und Milner (2003) gezeigt werden, dass

Probanden an stärkere Kraftfelder nicht komplett adaptieren konnten, während bei geringeren Kraftfeldern eine vollständige Adaptation stattfand.

Auch wenn es sich bei den oben genannten Studien um Experimente in strikten Laborsettings, in denen Zeigebewegungen durchgeführt worden sind, handelt und diese nur sehr bedingt auf den Anwendungsfall eines kombinierten Fahrbremspedals zulässig sind, werden folgende Überlegungen angeführt: Bisher gibt es keine Erkenntnisse zu einer energieoptimalen und akzeptablen maximalen Stärke der Rekuperation. Eine starke Rekuperation erscheint zunächst sinnvoll, da diese zumindest theoretisch das Potential hat, die Nutzung der hydraulischen Bremse einzuschränken und somit viel Energie in die Batterie einzuspeisen. Die Ergebnisse der oben genannten Experimente lassen allerdings auch die Hypothese zu, dass eine starke Rekuperation von Nachteil sein könnte: Je stärker die neue Pedalkennlinie von der bereits erlernten abweichen würde, desto größere Schwierigkeiten könnten beim Erlernen der Bedienung stattfinden und desto länger könnte die Adaptation dauern. Schwierigkeiten bei der Benutzung eines kombinierten Fahrbremspedals könnten darin bestehen, dass Fahrer zwischen Beschleunigen und Rekuperieren unnötig hin und her wechseln, weil sie Probleme damit haben den gewünschten Effekt herzustellen. Unnötiges Bremsen und Beschleunigen steht in Widerspruch mit vorausschauendem Fahren, einem wichtigen Ziel von Eco-Driving, und daher evaluiere ich in Kapitel 3.3 „Studie II: Die Stärke der rekuperativen Bremse“, welche Rekuperationsstärke zu bevorzugen ist und ob eine stärkere rekuperative Bremse tatsächlich kontraproduktiv für vorausschauendes Fahren ist.

Fazit. Die Ergebnisse in der Grundlagenforschung zeigen, dass Menschen in der Lage sind an dynamische Werkzeugtransformationen, wie sie in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, zu adaptieren, und zwar auch dann, wenn es sich um instabile Reaktions-Effekt-Beziehungen handelt. Zu beachten ist allerdings, dass die entsprechenden Studien meist unter kontrollierten Laborbedingungen stattfanden und daher nur bedingt auf die komplexe Fahrsituation übertragen werden können, in welcher der Fahrer einer Vielzahl von Reizen ausgesetzt ist, auf die er mit unterschiedlichen Handlungen reagieren muss (Querregelung und Längsregelung). Entsprechende Untersuchungen im anwendungsorientierten Kontext, wie ich sie in den vier Studien dieser Arbeit vornehme, sind daher notwendig, um auch die Adaptationsfähigkeit bzw. einen effektiven Umgang im Fahrkontext zu bestätigen.

Als Maß für die Adaptationsfähigkeit wird in der Grundlagenforschung oftmals die Schnelligkeit oder die Genauigkeit der Adaptation herangezogen. Dies lässt für die zu untersuchenden Maßnahmen zwar den Schluss zu, dass die Fahrer theoretisch an die Maßnahmen adaptieren und mit ihnen umgehen können. Rückschlüsse auf die subjektive Benutzerfreundlichkeit können jedoch nicht gezogen werden. Wie das adaptierte Verhalten bewertet wird, ist meist nicht Gegenstand der Grundlagenforschung. Für die angewandte Forschung ist dies allerdings bedeutsam, da es Auswirkungen auf die Akzeptanz einer Maßnahme hat. In der vorliegenden Arbeit möchte ich daher evaluieren, ob Fahrer ihr angepasstes Verhalten als benutzerfreundlich wahrnehmen. Für das kombinierte Fahrbremspedal und das aktive Beschleunigungspedal finden sich diesbezüglich in der Anwendungsforschung erste Hinweise für eine benutzerfreundliche Gestaltung, die ich in den entsprechenden Kapiteln im empirischen Teil der Arbeit zusammenfasse; für einen benutzerfreundlichen Limitierungsansatz fehlen bisher empirische Studien.

2.5 KOGNITIVE PROZESSE

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Eco-Assistenten und Fahrertrainings zu ergänzen und Eco-Driving weiter zu fördern. Insbesondere visuell dargebotene Assistenten können, bedingt durch von der Straße abgewandten Blicke, das Unfallrisiko um mindestens das Zweifache erhöhen, wenn die Blickdauer in der Summe zwei Sekunden übersteigt (Klauer, Dingus, Neale, Sudweeks, & Ramsey, 2006). Die Blickabwendungen, die nötig sind, um die Anzeige eines Informations- oder Assistenzsystems zu betrachten, zu verstehen, welche Bedeutung der Hinweis hat, und entsprechend zu reagieren, können mit einer Aufgabe wie dem Lesen einer SMS verglichen werden. Diese Aufgabe wird von Vollrath, Huemer, Nowak und Pion (2014) gleichgesetzt mit „eine SMS schreiben“ und hat laut Autoren einen vergleichbaren Effekt auf die Fahraufgabe wie 0.8 Promille Alkohol im Blut. Selbstverständlich ist hier nur eine sehr vorsichtige Einschätzung des Ablenkungsgrades möglich und müsste in eigens dafür angefertigten Studien belegt werden. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass die Ablenkung durch mehrere gleichzeitig agierende Systeme den negativen Einfluss auf das Fahrverhalten verstärkt. Da Autofahrer in jüngerer Zeit während der Fahrt zunehmend unterstützt, informiert, unterhalten und gewarnt werden, sollten zur Förderung von Eco-Driving verstärkt Maßnahmen und Assistenten in das Fahrzeug implementiert werden, die den Fahrer so wenig wie möglich von der Fahraufgabe ablenken. Im Folgenden möchte ich daher die Ansätze, die ich in der vorliegenden Arbeit untersuche, bezüglich des Ablenkungsgrades und der kognitiven Anforderungen einordnen.

Modell multipler Ressourcen. Wickens (2008) beschreibt in seinem *Modell der multiplen Ressourcen* die Teilprozesse der kognitiven Verarbeitung, wonach gerade bei regelbasierten Handlungen (vgl. Michon, 1985) zumindest drei Teilprozesse der kognitiven Verarbeitung zu unterscheiden sind: die Encodierung, die zentrale Verarbeitung und die Reaktionsausführung. Die zentrale Annahme dieses Modells ist, dass diese drei Verarbeitungsstufen sich weiter nach Modalität, Code und Reaktion unterteilen lassen, wie in Abbildung 9 zu sehen ist. Wickens (2008) regt hierbei eine Erweiterung der Modalitäten um die „haptische“ Ebene an. Die zweite zentrale Annahme des Modells ist, dass unterschiedliche Ressourcen parallel nutzbar und einzelne Ressourcen begrenzt teilbar und daher in ihrer Kapazität begrenzt sind. Für alle komplexen kognitiven Leistungen scheint die Kapazität ein entscheidender begrenzender Faktor zu sein (Oberauer, Mayr, & Kluwe, 2006).

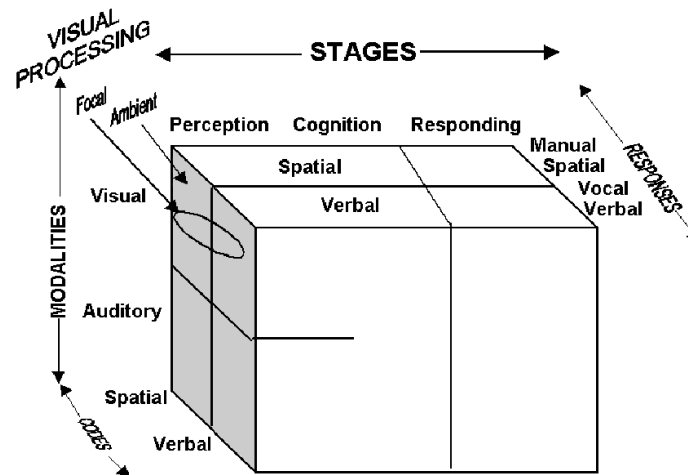


Abbildung 9: Angenommene Struktur der Verarbeitungsressourcen nach Wickens (2008). Abbildung entnommen von Wickens (2008).

Die wichtigste Encodier-Ressource für die Fahraufgabe ist die visuelle. Der Vorteil eines aktiven Beschleunigungspedals ist, dass Eco-Driving-Informationen und Hinweise haptisch übermittelt werden können und somit nicht, im Gegensatz zu konventionellen, visuell dargebotenen Eco-Feedback-Assistenten, mit der visuellen Encodier-Ressource interferieren. Daher ist die Übermittlung von haptischen Hinweisen zu befürworten. Im Folgenden möchte ich, über den Vorteil der geminderten visuellen Ablenkung hinaus, diskutieren, wie veränderte Pedal- und Motorkennlinien kognitiv verarbeitet werden und ob sich Vor- oder Nachteile für die Kapazität der zentralen Verarbeitung ergeben.

Kognitive Ebenen zielgerichteter Tätigkeiten. Das 3-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten nach Rasmussen (1983) beschreibt die kognitiven Prozesse bei Mensch-Maschine-Interaktionen. Nach Rasmussen (1983) kann die Fahraufgabe in drei Ebenen gegliedert werden (s. Abbildung 10 linke Seite): Fertigkeitbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten. Diese drei Ebenen können den drei Ebenen der Fahraufgabe nach Michon (1985) zugeordnet werden und zeigen, welche kognitiven Prozesse auf den jeweiligen Ebenen stattfinden: Fertigkeitbasiertes Verhalten ist hochautomatisiertes und zumeist unbewusstes Verhalten. Diese Ebene der Informationsverarbeitung ist der operationalen Ebene zuzuordnen. Regelbasiertes Verhalten wird bewusst eingesetzt und durch bereits erlernte Regeln geleitet. Diese Ebene der Informationsverarbeitung kann der taktischen Ebene zugeordnet werden. Wissensbasiertes Verhalten wird immer dann angewandt, wenn zuvor gelernte Regeln in der neuen Situation nicht übertragen werden können und ein neues Verhalten geplant werden muss. Dieser Ebene kann die strategische Ebene zugeordnet werden.

Die Ebenen sind hierbei hierarchisch gegliedert. Sensorische Eindrücke werden auf der fertigkeitbasierten Ebene erfasst und können unbewusst verarbeitet werden. Diese sensorischen Eindrücke können aber auch dazu führen, dass regel- oder sogar wissensbasiertes Verhalten notwendig wird und die Reize auf der jeweiligen Ebene verarbeitet werden. Der entworfene Handlungsplan bzw. die Auswahl einer Verhaltensregel wird dann wiederum auf die fertigkeitbasierte Ebene weitergeleitet und

hochautomatisierte motorische Programme werden aktiviert, die zur Ausführung des bewusst geplanten Verhaltens notwendig sind.

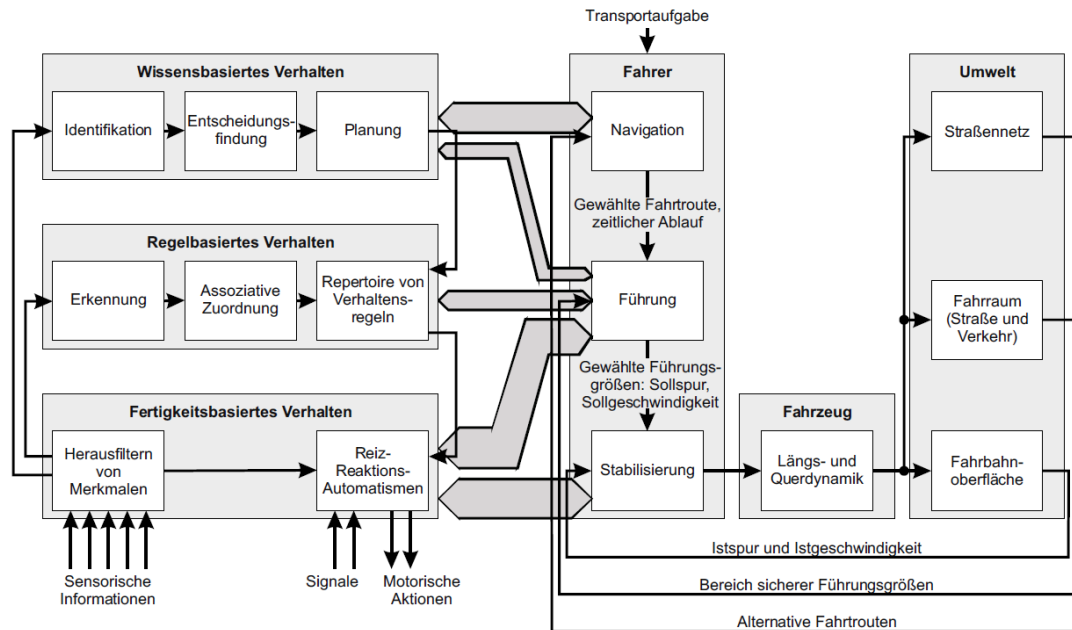


Abbildung 10: Zusammenführung der Modelle von Donges (1982); Michon (1985); Rasmussen (1983) nach Winner, Hakuli und Wolf (2009).

Nach Reichart und Haller (1995) nimmt die kognitive Anforderung auf der Führungs- und Planungsebene im Vergleich zur Stabilisierungsebene zu (vgl. Abbildung 11), während die Frequenz eben dieser anspruchsvollen Tätigkeiten gering ist.

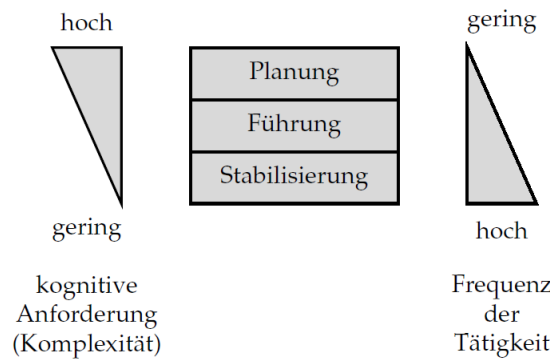


Abbildung 11: Kognitive Fahrerbeanspruchung. Abbildung entnommen von Radke (2013).

Das Ziel von Fahrertrainings, Eco-Assistenten und den Ansätzen der vorliegenden Arbeit ist es, vor allem die Stabilisierungs- und Führungsebene bzw. das fertigkeitbasierte und regelbasierte Verhalten zu beeinflussen (siehe hierzu Kapitel 2.1.1 „Definition“). Der Fahrer soll weniger stark beschleunigen, sich an Geschwindigkeitsbegrenzungen halten, vorausschauender fahren. Fahrertrainings und Eco-Assistenten müssen anfangs auf allen und somit auch auf der höchsten Ebenen verarbeitet werden: Die Bedeutung von Anzeigen und eine geeignete nachfolgende Reaktion müssen zunächst auf der wissensbasierten

Ebene gelernt werden. Dieses Wissen beziehungsweise die Strategien müssen dann in regelbasiertes und fertigkeitbasiertes Verhalten überführt werden. Mit fortschreitender Zeit und Übung werden der Übergang und die Aktivierung des entsprechenden regelbasierten und fertigkeitbasierten Verhaltens mit zunehmend weniger kognitiven Anforderungen verbunden sein; im besten Fall findet ein Übergang von der wissensbasierten hin zur fertigkeitbasierten Ebene statt. Die Ebenen der Verarbeitung und Planung sind allerdings (zumindest zu Beginn) auf einem Niveau, das eher einer hohen kognitiven Anforderung entspricht.

Veränderungen von Pedal- und Motorkennlinien haben zumindest das Potential, von Beginn an nicht auf der obersten Ebene verarbeitet zu werden. Die Adaptation an derartige Veränderungen, also an veränderte dynamische Werkzeugtransformationen, findet in der Regel unbewusst und daher mit geringer kognitiver Beanspruchung statt (siehe Kapitel 2.4.2 „Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit“). Die Kennlinien müssen allerdings benutzerfreundlich gestaltet sein, um eine höhere kognitive Verarbeitung zu vermeiden. Hinweise auf eine geminderte Benutzerfreundlichkeit des aktiven Beschleunigungspedals ergeben sich aus dem vorhergehenden (oben genannten) Kapitel. Das aktive Beschleunigungspedal bewirkt einen für den Fahrer neuen und inkonsistenten Zusammenhang von Pedalstellung und -gegenkraft. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn Widerstände plötzlich abhängig von Fahrzeug- oder Situationsparametern aktiviert werden. Je auffälliger und unerwarteter dies geschieht, desto bewusster werden die Widerstände wahrgenommen und verarbeitet sowie Vermeidungsstrategien entwickelt. Dies hätte eine Verarbeitung auf der regelbasierten oder sogar der wissensbasierten Ebene und daher eine stärkere Beanspruchung kognitiver Ressourcen zur Folge. Da durch die Limitierung der Leistung und des Drehmoments nicht an derart inkonsistente dynamische Werkzeugtransformationen adaptiert werden muss, wird eine geringere kognitive Beanspruchung als bei der Verwendung eines aktiven Beschleunigungspedals erwartet. Aber auch der Limitierungsansatz muss so gestaltet sein, dass der Fahrer nicht die Erfüllung der Fahraufgabe bedroht sieht (beispielsweise schnell von A nach B zu kommen) und folglich bewusst Strategien entwickelt, um die Effekte der Maßnahme zu kompensieren (beispielsweise eine alternative Route zu wählen). Dies würde ebenfalls zur Verarbeitung auf höchster Ebene und somit zu gesteigerter kognitiver Beanspruchung führen. Die Benutzerfreundlichkeit ist also nicht nur relevant für Effektivität und Akzeptanz einer Maßnahme, sondern auch für deren kognitive Verarbeitung und Beanspruchung.

Zusammenfassung. Die Adaptation an neue Pedal- und Motorkennlinien kann automatisiert erfolgen und daher mit geringerer kognitiver Beanspruchung als der Umgang mit visuell dargebotenen Eco-Assistenten verbunden sein. Die Kennlinien müssen hierzu allerdings benutzerfreundlich gestaltet sein, damit die Interaktion mit diesen nicht auf regel- und wissensbasierter Ebene nach Rasmussen (1983) erfolgt. Das aktive Beschleunigungspedal könnte aufgrund des komplexen inkonsistenten Zusammenhangs von Pedalstellung und -gegenkraft benutzerunfreundlicher als der Limitierungsansatz wahrgenommen werden und dazu führen, dass bewusst auf die Widerstände reagiert und Strategien zu deren Vermeidung erarbeitet werden. In Studie IV vergleiche ich daher die Benutzerfreundlichkeit des Limitierungsansatzes und des aktiven Beschleunigungspedals

und untersuche deren Einfluss auf die wahrgenommene kognitive Belastung und Beanspruchung.

2.6 ZUSAMMENFASSUNG UND FRAGESTELLUNG

Das Konzept Eco-Driving umfasst verschiedene Fahrverhaltenskomponenten, die es parallel zu fördern gilt, um eine maximale Energieeffizienz zu erzielen. Dazu zählen die Förderung von energieeffizientem Beschleunigen und Verzögern, energieeffizientem Geschwindigkeitsverhalten und vorausschauendem Fahren. Ansatzpunkte, die genanntes Potential haben, sind die Implementierung eines kombinierten Fahrbremspedals zur Verbesserung des Verzögerungsverhaltens, die Limitierung von maximaler Leistung und maximalem Drehmoment zur Verbesserung des Beschleunigungsverhaltens sowie die Implementierung eines aktiven Beschleunigungspedals zur Optimierung diverser Eco-Driving-Komponenten. Bisher fehlen wissenschaftliche Erkenntnisse, die diese Ansätze zur Förderung von Eco-Driving für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung der Effektivität und Akzeptanz evaluieren oder validieren.

Die zu untersuchenden Ansätze führen zu zum Teil instabilen Veränderungen erlernter dynamischer motorischer Transformationen im Bereich der wichtigsten Bedienschnittstelle im Fahrzeug, nämlich der Pedalerie. Ergebnisse der Grundlagenforschung zeigen zwar, dass Menschen an derartige Veränderungen prinzipiell adaptieren können. Allerdings handelt es sich dabei um Erkenntnisse aus strikten Laborsettings, die nur bedingt Rückschlüsse auf die Adaptationsfähigkeit in komplexen Fahrsituationen zulassen. Zudem wird in der Grundlagenliteratur nicht hinterfragt, ob das notwendige adaptierte Verhalten akzeptabel ist. Die Adaptationsfähigkeit und Akzeptanz gilt es demnach am konkreten Anwendungsfall zu klären. Aufschluss darüber, wie gut die Fahrer an die jeweilige Maßnahme adaptieren können, werden einerseits diverse Fahrverhaltensparameter sowie der objektive Nutzen (Steigerung der Energieeffizienz) geben. Wie akzeptabel das notwendige Verhalten ist, muss darüber hinaus für jede Maßnahme erfragt werden und in die abschließende Bewertung der Maßnahme einfließen.

Im Vergleich zu visuell dargebotenen Eco-Assistenten haben die genannten Ansätze das Potential, den Fahrer weniger stark kognitiv zu beanspruchen, allerdings geschieht das nur dann, wenn eine hohe Benutzerfreundlichkeit erzielt werden kann. Hierbei wird insbesondere für das aktive Beschleunigungspedal eine geringere Benutzerfreundlichkeit aufgrund der inkonsistent auftretenden Widerstände erwartet. Die kognitive Belastung und Beanspruchung bei der Nutzung der Maßnahmen wird daher miterfasst und fließt in die Bewertung ein. Darüber hinaus werden Empfehlungen zur Optimierung der Benutzerfreundlichkeit abgeleitet.

Fragestellung. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zu untersuchen, wie wirksam und akzeptabel veränderte Pedal- und Motorkennlinien sind, um verschiedene Eco-Driving-Fahrverhaltensbereiche zu fördern. Zusammenfassen möchte ich mit den vier Studien folgende Fragen beantworten:

- **Studie I:** Welche Vorteile hat eine Pedallösung, bei der mit dem Beschleunigungspedal rekuperiert wird (kombiniertes Fahrbremspedal), für die Förderung einer energieeffizienten Fahrweise im Gegensatz zu einer Pedallösung, bei der mit dem Bremspedal rekuperiert wird? Gelingt es den Fahrern, das kombinierte Fahrbremspedal derart zu nutzen, dass sie zu einem großen Teil auf die hydraulische Bremse verzichten können, und wie bewerten die Fahrer diese Lösung?
- **Studie II:** Wie stark sollte ein kombiniertes Fahrbremspedal maximal rekuperieren, um den Fahrer am wirkungsvollsten darin zu unterstützen, energieeffizient zu fahren? Sollte die Rekuperation möglichst stark sein, um möglichst viel Energie zu rekuperieren oder tendenziell schwächer, weil damit theoretisch ein vorausschauenderes (gleichmäßigeres) Fahren möglich ist? Mit welcher Rekuperationsstärke sind die Fahrer am zufriedensten?
- **Studie III:** Welcher Limitierungsansatz (Limitierung des maximalen Drehmoments vs. Limitierung der maximalen Leistung) mit welcher Limitierungsstärke ist am geeignetsten, den Fahrer dabei zu unterstützen, energieeffizient zu beschleunigen? Kann der Fahrer solche Limitierungen akzeptieren?
- **Studie IV:** Welcher Ansatz ist akzeptabler und effektiver: der Limitierungsansatz (optimiert basierend auf Studie III) oder ein aktives Beschleunigungspedal? Ist weiterhin ein aktives Beschleunigungspedal auch im Elektroauto wirksam und können Eco-Driving-Verhaltensweisen gefördert werden, die speziell für das Fahren eines Elektroautos relevant sind? Welcher Ansatz führt zu einer höheren kognitiven Beanspruchung?

Alle vier Studien werde ich nach dem gleichen Schema aus und orientiere mich hierbei an den folgenden fünf Leitfragen:

- (1) Welche Aspekte einer energieeffizienten Fahrweise werden durch die jeweilige Anpassung der Kennlinie auf welche Weise beeinflusst?
- (2) Ist die Veränderung des Fahrverhaltens derart wirksam, dass der Verbrauch signifikant reduziert werden kann?

Zu diesem Zweck analysiere ich alle Fahrverhaltensparameter, die Eco-Driving kennzeichnen. Vor dem Hintergrund der begrenzten Reichweite von Elektroautos untersuche ich zudem, inwiefern die Veränderung des Fahrverhaltens den Verbrauch effektiv reduzieren kann. Hierbei werde ich zum einen die am Ende einer jeden Fahrt verbrauchte Energie aber auch die in der Summe entnommene und rekuperierte Energie aus. Dies erlaubt eine differenzierte Bewertung der Effektivität der angepassten

Kennlinien. Darüber hinaus analysiere ich, in welchen Fahrsituationen eine Anpassung der Kennlinien besonders wirksam ist und möchte damit folgende Frage beantworten:

- (3) In welchen Fahrsituationen hat die Anpassung der Kennlinien einen Einfluss auf den Verbrauch und worauf ist die Effektivität in den entsprechenden Situationen zurückzuführen?

Hierzu analysiere ich den Verbrauch und das Fahrverhalten auf Situationsebene. Weiterhin überprüfe ich, ob es Wechselwirkungen des Fahrstils und der jeweiligen Kennlinien gibt. Dies soll Aufschluss darüber geben, ob beispielsweise besonders effiziente Fahrer mit allen Kennlinien vergleichbar wenig Energie verbrauchen, während ineffiziente Fahrer den Verbrauch reduzieren können. Damit möchte ich folgende Forschungsfrage beantworten:

- (4) Reduzieren allen Fahrertypen (effiziente vs. ineffiziente Fahrer) gleichermaßen den Verbrauch durch die Anpassung der Kennlinien?

Schließlich hängt der Erfolg bzw. die dauerhafte Nutzung einer Maßnahme von deren Akzeptanz ab bzw. davon, wie gut es den Fahrern gelingt, mit dieser umzugehen. Daher soll die folgende Frage beantwortet werden, um eine ganzheitliche Beurteilung der jeweiligen Maßnahme zu ermöglichen:

- (5) Wie werden die Anpassungen der Kennlinien und das damit einhergehende Fahrzeug- und Fahrverhalten bewertet?

Für jede Studie stelle ich die Ergebnisse entsprechend der Leitfragen in der oben genannten Reihenfolge dar und diskutiere diese.

3 EMPIRISCHER TEIL

3.1 ALLGEMEINE UNTERSUCHUNGSMETHODIK

In allen vier Studien ist derselbe Fahr Simulator und dasselbe Elektroautomodell verwendet worden. Weiterhin wurden, basierend auf der allgemeinen Fragestellung, immer die gleichen Fahrverhaltensparameter ausgewertet und die Auswertungsroutine sowie die verwendete Teststrecke waren in weiten Teilen vergleichbar. In den folgenden Kapiteln sind daher alle methodischen Gesichtspunkte aufgeführt, die für alle vier Studien gelten. Etwaige Abweichungen sind in den Methoden-Unterkapiteln der jeweiligen Studien aufgeführt.

3.1.1 Beschreibung des Fahr Simulators

Alle Messfahrten fanden im Würzburger Fahr Simulator mit Bewegungssystem am Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (WIVW GmbH) statt. Es handelt sich hierbei um einen voll instrumentierten, serielieferten BMW 520i mit Automatikgetriebe, der sich in einer Stewart-Plattform mit sechs Freiheitsgraden (Hexapod, siehe Abbildung 12) befindet. Das Sichtfeld beträgt 180° und wird über drei Projektoren (CRT - Cathode Ray Tube) auf eine sphärische Leinwand projiziert. Sowohl die Außen- als auch der Innenspiegel werden durch LCD-Monitore simuliert. Er kann eine lineare Beschleunigung von bis zu 5m/s^2 und eine rotatorische von bis zu $100^\circ/\text{s}^2$ darstellen. Das Bewegungssystem besteht aus sechs elektropneumatischen und drei passiven, pneumatischen Aktuatoren (Hub $\pm 60\text{cm}$; Neigung $\pm 10^\circ$). Die Fahrdaten werden kontinuierlich mit 100 Hz mit der Software SILAB der WIVW GmbH aufgezeichnet.



Abbildung 12: Der Würzburger Fahr Simulator mit Bewegungssystem.

3.1.2 Das Elektroautomodell für die Fahrsimulation

Das Projekt eFuture, in dessen Rahmen die Studien der vorliegenden Arbeit zum Teil durchgeführt worden sind, hatte zum Ziel, die nächste Generation von Elektrofahrzeugen vorzubereiten (eFuture, 2013). Hierzu ist ein Prototyp, basierend auf einem Tata Indica Vista EV, entwickelt und aufgebaut worden. Dem in den WIVW-Simulator implementierten und in den vier Studien verwendeten Simulationsmodell liegt dieser Prototyp zugrunde. Das Simulationsmodell wurde hierbei in Realfahrversuchen validiert und bildet neben fahrdynamischen Variablen auch den Verbrauch des Prototypen ab.

Weiterhin basiert das Modell auf einer Lithium-Ionen-Batterie mit einer maximalen Kapazität von 25 kWh und zweier unabhängiger Elektromotoren. Auf diese Weise kann das Fahrverhalten sowie der Verbrauch eines Kleinwagen-Elektrofahrzeugs realitätsnah erzeugt und untersucht werden.

Weiterhin ist in allen vier Studien das in Abbildung 13 dargestellte Kombiinstrument verwendet worden, welches mittels eines Displays dem Fahrer präsentiert wurde. Die auf der rechten Seite positionierte Leistungsanzeige ist in drei farblich abgegrenzte Teilbereiche untergliedert. Der grüne Bereich markiert den Rekuperationsbereich, der orangefarbene und rote Bereich kennzeichnen den Beschleunigungsbereich. Wenn sich der Zeiger der Leistungsanzeige auf der Nullposition befindet, segelt oder steht das Fahrzeug.

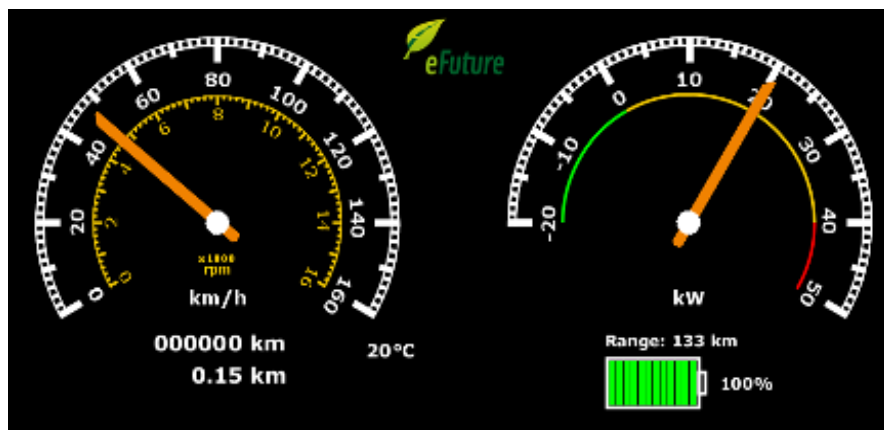


Abbildung 13: Kombiinstrument, welches in allen vier Studien verwendet wurde. Links: Tacho; Rechts: Leistungsanzeige.

3.1.3 Die Teststrecke

Brundell-Freij und Ericsson (2005) identifizierten diejenigen Umwelt- bzw. Straßencharakteristika, die einen besonders starken Einfluss auf das Fahrverhalten haben:

- Auftreten und Häufigkeit von Kreuzungen mit Ampelschaltung
- Geschwindigkeitsbegrenzungen
- Straßentyp (Landstraße, Autobahn, Ortsdurchfahrtsstraße, etc.)
- Nachbarschaft / Umgebung (Finanzdistrikt, Wohngegend, etc.).

Um ein möglichst vielfältiges und repräsentatives Fahrverhalten zu erzeugen, sind die Teststrecken für die vier Studien entsprechend dieser Umweltcharakteristika gestaltet und programmiert worden. Jede Strecke war unterteilt in Innerorts- und Außerortsabschnitte, die wiederum folgendermaßen aufgebaut waren:

- Innerortsabschnitt
 - Kreuzungen mit Stoppschild und kreuzendem Verkehr
 - Mehrmaliger Wechsel von Zonen mit 50 km/h und 30 km/h
 - Kurven mit unterschiedlichen Radien
 - Überholsituationen: beispielweise stehender Bus

- Außerortsabschnitt
 - Kreuzungen mit Stoppschild und kreuzendem Verkehr
 - Anstiege und Gefälle mit unterschiedlichen Steigungen
 - Kurven mit unterschiedlichen Radien
 - Mehrmaliger Wechsel von 100 km/h und 70 km/h Zonen

Abbildung 14 bis Abbildung 16 zeigen beispielhaft einige Szenarien, die für jede Teststrecke verwendet wurden.



Abbildung 14: Scharfe Linkskurve mit einem Radius von 70 m (links) und Ortseinfahrt (rechts).



Abbildung 15: Starke Steigung (10%; links) und starkes Gefälle (10%; rechts).



Abbildung 16: Kreuzung innerorts mit querendem Verkehr aus der Vogelperspektive.

Es wurde eine Wechselwirkung der jeweiligen Optimierungsmaßnahmen mit bestimmten Szenarien erwartet, weswegen eine Analyse des Verbrauches und des Fahrverhaltens nicht nur für die gesamte Strecke sondern auch für jedes Szenario (Steigung, Gefälle, Kurve, gerader Abschnitt mit 100 km/h Geschwindigkeitsbegrenzung, etc.) einzeln durchgeführt wurde. Hierbei ist zu beachten, dass jede vorhergehende und nachfolgende Situation Einfluss auf das Fahrverhalten im jeweiligen Streckenabschnitt nehmen kann. Dies wird bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt.

Auf die Einbindung von Autobahnfahrten wurde in allen vier Studien verzichtet, da das Fahren auf der Autobahn, aufgrund der hohen Geschwindigkeiten und dem damit verbundenen hohen Verbrauch, bisher nur für sehr begrenzte Zeit mit Elektrofahrzeugen möglich ist und daher momentan noch einen eher untergeordneten Anwendungsfall für das Elektroauto darstellt.

3.1.4 Die Stichprobe

Alle Probanden stammten aus dem WIVW Testfahrerpanel, waren im bewegten Simulator trainiert (Training basiert auf dem evaluierten Trainingsprogramm von Hoffmann & Buld, 2006) und hatten im Vorfeld bereits an mindestens einer Fahrstudie teilgenommen. Keiner der Fahrer hatte nennenswerte Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Stichproben, die in den jeweiligen Studien teilgenommen haben.

Tabelle 1: Charakteristika der vier Stichproben in den entsprechenden Studien.

Studie	Stichprobengröße	Alter	Fahrerfahrung	Gefahrene Kilometer pro Jahr	Kommentare
Studie I: Das kombinierte Fahrbremspedal	N = 24 (10 Frauen)	M = 35 Jahre (SD = 10)	15 Jahre (SD = 9)	M = 16854 km (SD = 13700)	
Studie II: Die Stärke der rekuperativen Bremse	N = 6 (3 Frauen)	M=39 Jahre (SD = 6)	16 Jahre (SD = 10)	M = 16675 (SD = 12450)	Keiner der Fahrer hatte an Studie I teilgenommen
Studie III: Limitierung	N = 24; (10 Frauen)	M = 35 Jahre (SD = 10)	15 Jahre (SD=9)	M = 16854 km (SD = 13700)	Dieselbe Stichprobe wie in Studie I
Studie IV: Das aktive Beschleunigungspedal	N = 19 (9 Frauen)	M = 35 Jahre (SD = 10)	17 Jahre (SD = 10)	M = 16658 km (SD = 12290)	Keiner der Fahrer hatte Erfahrung mit einem aktiven Beschleunigungspedal

3.1.5 Messparameter

Abgeleitet von den Energiesparregeln für und den relevanten Charakteristika von Elektrofahrzeugen sowie der für Eco-Driving und den Energieverbrauch relevanter Fahrverhaltensparameter nach Ericsson (2001) und Kuhler und Karstens (1978) ergeben sich nachfolgende relevante Fahrverhaltens- und Verbrauchsparameter. Zur Analyse des Fahrverhaltens sind in der vorliegenden Arbeit für alle vier Studien folgende Parameter verwendet worden:

- Mittlere Geschwindigkeit für die gesamte Fahrt (Standzeiten ausgeschlossen) [km/h]
- Standardabweichung der Geschwindigkeit (Standzeiten ausgeschlossen)
- Mittlere Beschleunigung ($a_x > 0$) [m/s^2]
- Generelle mittlere Verzögerung ($a_x < 0$) [m/s^2]
- Mittlere Verzögerung, wenn mit der rekuperativen Bremse gebremst wird [m/s^2]
- Anteil der Zeit (an der Gesamtfahrtzeit) in Prozent, in der die hydraulische Bremse (HB) betätigt wurde [%]
- Anteil der Zeit an der Gesamtfahrtzeit in Prozent, in der die rekuperative Bremse (RB) betätigt wurde [%]
- Anteil der Zeit an der Gesamtfahrtzeit in Prozent, in der gesegelt wurde [%].

Für den Verbrauch wurden nachfolgende Parameter berechnet und analysiert:

- Summe der verbrauchten Energie (Summe aus entnommener und rekuperierter Energie) [kWh]
- Summe der entnommenen Energie [kWh]
- Summe der rekuperierten Energie [kWh].

Messparameter, die darüber hinaus erhoben wurden, werden im Kapitel der jeweiligen Studie beschrieben.

3.1.6 Datenaufbereitung, statistische Auswertung und Diagramme

Bevor die Daten interferenzstatistisch ausgewertet werden konnten, mussten sie zunächst getrennt für jede Bedingung über ihre Deskriptiva aggregiert werden. Alle erzeugten Parameter wurden über alle Versuchspersonen gemittelt und mit Hilfe von Varianzanalysen mit Messwiederholung (oder mit Hilfe von t-Tests für abhängige Stichproben) dahingehend getestet, ob die jeweilige Optimierungsmaßnahme Effekte auf die Energieeffizienz, das Fahrverhalten und die Akzeptanz hat. Im Falle eines signifikanten Haupteffektes erfolgten post-hoc t-Tests für abhängige Stichproben. Die Aufbereitung der Daten erfolgte mit Hilfe der Software SPSS Version 20 und 21 für Windows.

Sofern ein Effekt auf den Verbrauch (bezogen auf die Gesamtfahrt) signifikant war, erfolgte eine detaillierte Analyse der Verbrauchs- und Fahrverhaltensparameter auf Szenarienniveau. Für diese Situationsanalyse wurde ein Szenario als ein mit SILAB generierter Programmierabschnitt definiert: ein gerader Streckenabschnitt, eine Kurve, eine Ortsein- und -ausfahrt, etc. Vorausgesetzt, das Datenniveau der Fragebogendaten erlaubte es, wurden auch diese mit Hilfe von Varianzanalysen mit Messwiederholung auf Mittelwertunterschiede getestet. Sollten statistische Analysen von der hier dargestellten Weise abweichen, so wird dies innerhalb des Methodenteils der jeweiligen Studie genauer beschrieben. Bei allen in der gesamten Arbeit dargestellten Konfidenzintervallen handelt es sich um speziell für Messwiederholungsversuchspläne angepasste Konfidenzintervalle, welche entsprechend Cousineau (2005) um die Zwischensubjektvarianz bereinigt wurden. Auf das Multiplizieren der Konfidenzintervalle mit dem Faktor $\sqrt{2}$ wurde verzichtet.

3.2 STUDIE I: DAS KOMBINIERTE FAHRBREMSPEDAL³

3.2.1 Fragestellung

Im Elektroauto kann Rekuperation, also die Einspeisung von Energie in die Batterie, auf verschiedene Weise erreicht werden. Je nachdem, wie die Pedalkennlinien gestaltet sind, kann dies durch Drücken des Bremspedals, durch Lösen des Beschleunigungspedals oder aber durch beides gleichzeitig bewirkt werden. Bereits in den frühen sechziger Jahren befasste sich eine Forschergruppe der Kansas State University mit der Optimierung der Pedalerie von Personenkraftwagen, obgleich der Grund für die Implementierung nicht in einer Steigerung der Energieeffizienz, sondern in der Steigerung der Fahrsicherheit lag. Die Forscher untersuchten in ihren Experimenten eine Pedalapparatur, bei der das Beschleunigungspedal derart modifiziert wurde, dass es sowohl als Beschleunigungspedal als auch als Bremspedal fungierte. Es funktionierte wie eine Art Wippe: Mit dem vorderen Fußballen und den Zehen wurde durch Ausübung von Druck beschleunigt, während durch die Ferse ausgeübter Druck die Bremse betätigt. Konz, Wadhera, Sathaye und Chawla (1971) berichten, dass durch das kombinierte Fahrbremspedal Reaktionszeitverkürzungen von 0.2 Sekunden ermittelt wurden. Dies entspricht laut den Autoren etwa einer Wagenlänge bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h und Reaktionszeiten könnten somit sicherheitsrelevant verkürzt werden. Auch Poock, West, Toben und Sullivan (1973) veröffentlichten eine Studie zum Thema Fahrsicherheit mit vergleichbarer kombinierter Fahrbremspedalapparatur und konnten eine Bremsreaktionszeitverkürzung von 45% nachweisen. Darüber hinaus berichten die Autoren, dass die Fahrer die neue Pedallösung akzeptierten und sie ihnen gut gefallen habe. Bereits nach drei Durchgängen hätten sich die Fahrer an die neue Pedallösung gewöhnt und hätten keinerlei Schwierigkeiten mit deren Bedienung. Auch in jüngeren Studien mit weiterentwickelter Technik wird betont, dass Fahrer schnell den Umgang mit einem kombinierten Fahrbremspedal lernen und dieses einer konventionellen Pedallösung vorziehen (Nilsson, 2002). Trotz des erkannten Potentials zur Verkürzung von Bremsreaktionszeiten und einem möglichen Rückgang von Unfällen, die auf Fehlbedienungen der Pedalerie zurückzuführen sind, setzte sich diese Art der Pedalgestaltung bis heute in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren nicht durch.

Die Verschmelzung von Beschleunigungs- und Bremspedal im Elektroauto zu einem kombinierten Fahrbremspedal kann als eine moderne Variante des oben beschriebenen kombinierten Fahrbremspedals verstanden werden. Heutzutage findet man beispielsweise im BWM Mini E ein kombiniertes Fahrbremspedal. Die Rekuperationsstärke nimmt beim BMW Mini E mit zunehmender Geschwindigkeit ab: Während man also im Stadtverkehr die Bremse beim Verlassen des Beschleunigungspedals recht deutlich spürt, ist die Verzögerung bei hohen Geschwindigkeiten weniger deutlich spürbar. 98% der Fahrer einer Studie im Feldversuch im amerikanischen Raum mit dem BMW Mini E befanden die neuartige Bremsfunktion für gut (Turrentine, Garas, Lentz, & Woodjack, 2011). Auch die deutschen Nutzer waren laut Vattenfall GmbH (2011) begeistert von der Rekuperationsfunktion, die sie während eines Feldversuches kennenlernen durften. So

³ Diese Studie ist in Teilen bereits veröffentlicht (siehe Jagiellowicz, Schmitz, Maag, & Hanig, 2012; Schmitz, Maag, Jagiellowicz, & Hanig, 2013).

berichten die Fahrer außerdem, dass sie wegen der Rekuperationsfunktion in den meisten Fällen auf die normale Bremse verzichten konnten und oft bewusst rekuperierten, um Energie zurückzugewinnen. Cocron et al. (2013) berichten, dass die Nutzung der Rekuperationsfunktion eine steile Lernkurve und somit einen sehr kurzen Adaptationsprozess zeigt und dass nach kurzer Nutzungszeit der Anteil konventioneller Bremsmanöver zurückging (Cocron, 2014). Die Akzeptanz der Fahrer war darüber hinaus sehr hoch, auch wenn einige wenige Fahrer von Schwierigkeiten beim Umgang mit der Rekuperationsfunktion berichteten.

Die Befunde in der Literatur zeigen, dass ein kombiniertes Fahrbremspedal von Fahrern akzeptiert wird, schnell erlernt werden kann und Fahrer laut eigenen Angaben vermehrt auf das Bremsen mit der hydraulischen Bremse verzichten. Vor dem Hintergrund von Eco-Driving ist ein solches Verhalten wünschenswert und sollte im Elektroauto gefördert werden. Dennoch fehlt bisher eine wissenschaftliche Validierung, welche den Vorteil eines kombinierten Fahrbremspedals zur Förderung einer energieeffizienten Fahrweise insbesondere im Vergleich zu einer Pedallösung, bei der mit dem Bremspedal rekuperiert wird, darlegt. Die erste Studie sollte daher nachfolgende Fragen beantworten: Kann eine kombinierte Fahrbremspedallösung Eco-Driving im Gegensatz zu einer herkömmlichen Zwei-Pedallösung wirksam und akzeptabel fördern? Gelingt es den Fahrern, das kombinierte Fahrbremspedal derart zu nutzen, dass sie größtenteils auf die hydraulische Bremse verzichten können, und kann diese Verhaltensänderung signifikant zu einer Erhöhung der Reichweite beitragen? Gibt es darüber hinausgehende Aspekte von Eco-Driving, die durch diese Maßnahme gefördert werden können? Gibt es Nachteile oder Probleme, die bei der Benutzung einer derartigen Pedalerie entstehen? Wird ein kombiniertes Fahrbremspedal im Vergleich zu einer Zwei-Pedal-Lösung bevorzugt?

Zu diesem Zweck habe ich zwei Pedallösungen, eine kombinierte, bei der mit dem Beschleunigungspedal rekuperiert wird, und eine konventionelle, bei der mit dem Bremspedal rekuperiert wird, in das Simulationsmodell implementiert und den Einfluss der Pedallösung auf die Akzeptanz und Energieeffizienz untersucht. Die Testfahrer durchführten hierzu eine repräsentative Teststrecke im Simulator mit beiden Pedallösungen. Dies erlaubte einen objektiven Vergleich des Fahrverhaltens und der Energieeffizienz und darüber hinaus, durch die Anwendung einer abhängigen Versuchsanordnung, einen direkten Vergleich der Gebrauchstauglichkeit beider Varianten.

3.2.2 Methoden

3.2.2.1 Pedalvarianten

Abbildung 17 veranschaulicht die Funktionsbelegungen eines kombinierten Fahrbremspedals (combined pedal solution; CPS) und einer Pedallösung, bei der mit dem Bremspedal rekuperiert wird (split pedal solution; SPS), wie sie in der vorliegenden Studie verwendet wurden. Die Funktionsbelegungen wurden in Vortests erarbeitet. Das kombinierte Fahrbremspedal ist in drei Zonen unterteilt: Die ersten 20% des Pedals bilden die rekuperative Bremse, der darauffolgende Bereich (von 20-30%) bildet den Segelbereich und der verbleibende größte Abschnitt des Pedals (30-100%) bildet den Beschleunigungsabschnitt. Wird das kombinierte Fahrbremspedal betätigt, wenn das Fahrzeug noch steht, so beginnt das Fahrzeug erst zu beschleunigen, wenn 30% oder mehr

des Pedals durchgedrückt werden. Die Stärke der rekuperativen Bremskraft kann vom Fahrer über die Pedalstellung variiert werden. Sie nimmt mit abnehmendem Pedalweg zu. Wird bei voller Fahrt weder das kombinierte Fahrbremspedal vollständig gelöst, so entfaltet sich eine maximale rekuperative Bremskraft, die in einer maximalen Verzögerung von -2.0 m/s^2 resultiert.

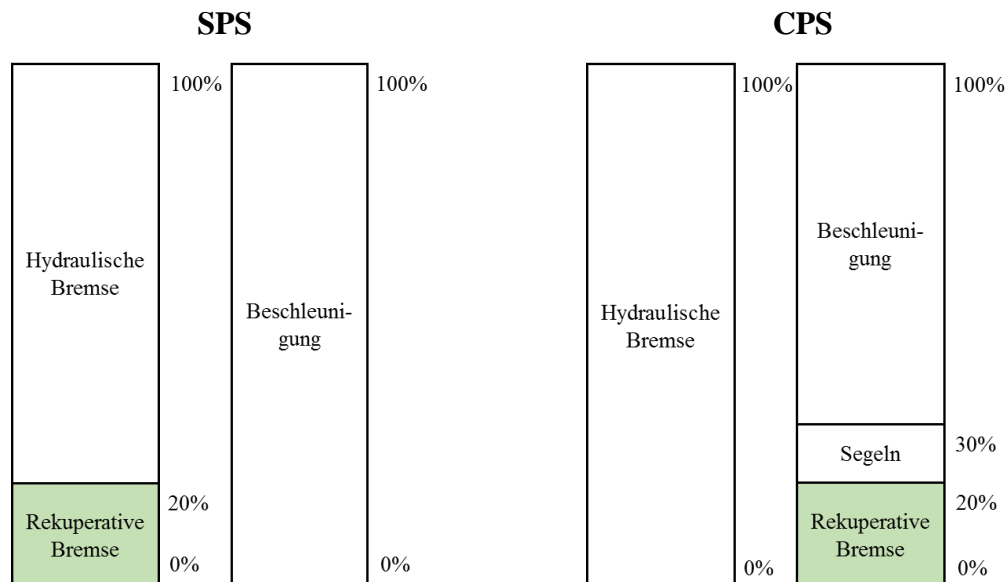


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Funktionsbelegungen (Beschleunigen, Segeln, Rekuperieren und hydraulisches Bremsen) für die beiden Pedalvarianten SPS und CPS. Dargestellt sind jeweils links das Brems- und rechts das Beschleunigungspedal.

Bei der Pedalvariante SPS liegt die rekuperative Bremse auf den ersten 20 % des Pedalweges der hydraulischen Bremse und entfaltet bei 20 % des Pedalweges die maximale Rekuperation, die ebenfalls eine Verzögerung von maximal -2.0 m/s^2 bewirkt. Auch hier kann aber durch eine geringere Bremspedalstellung schwächer verzögert werden. Wird das Pedal um mehr als 20 % durchgedrückt, so greift zusätzlich die hydraulische Bremse. Es wird allerdings weiterhin voll rekuperiert. Wenn weder das Brems- noch das Beschleunigungspedal betätigt werden, segelt das Fahrzeug in dieser Bedingung. Abbildung 18 zeigt die Kennlinien in beiden Bedingungen für das Beschleunigungspedal und für das Bremspedal in der Bedingung SPS.

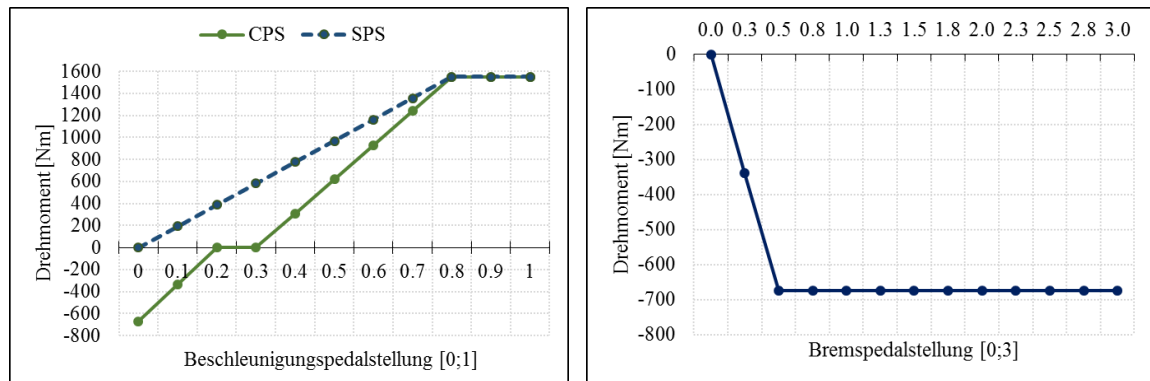


Abbildung 18: Kennlinien mit den Kenngrößen Pedalstellung und Drehmoment, des Beschleunigungspedals in den Bedingungen CPS und SPS (links) und des Bremspedals in der Bedingung SPS (rechts).

3.2.2.2 Teststrecke

Die Teststrecke hatte insgesamt eine Länge von 7180 Metern (für einen detaillierten Überblick über den chronologischen Ablauf der Strecke siehe Tabelle 20 im Appendix⁴). Die Strecke besteht aus 46 Situationen, welche auf Programmierabschnitte zurückzuführen sind. Diese werden in der Situationsanalyse einzeln betrachtet. Abbildung 19 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf aller 24 Fahrer über die gesamte Strecke und stellt dar, dass die Teststrecke anspruchsvoll und abwechslungsreich ist und viele Beschleunigungs- und Verzögerungsmanöver sowohl innerorts als auch außerorts umfasst.

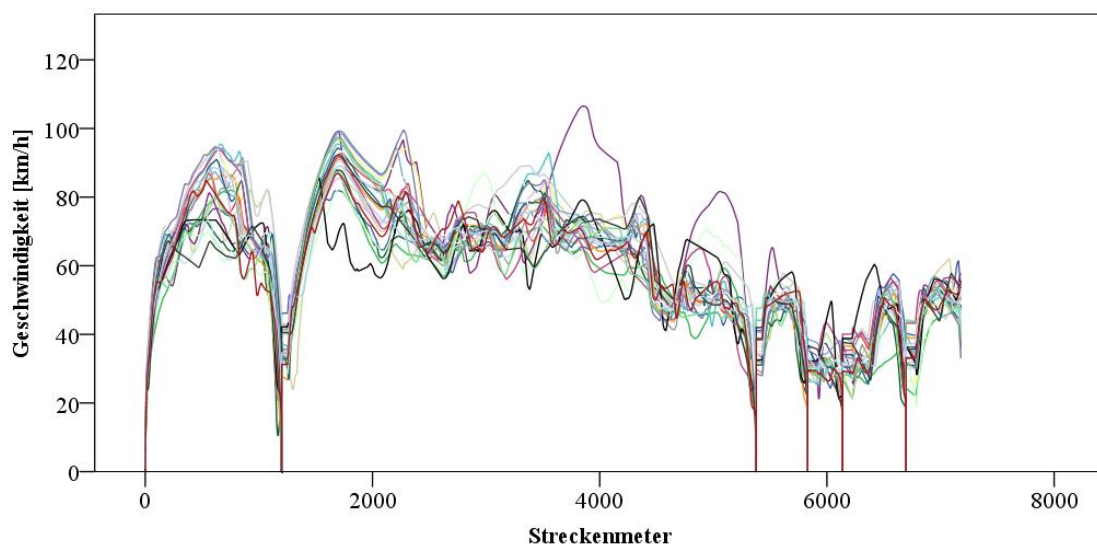


Abbildung 19: Das Geschwindigkeitsprofil der Teststrecke. Dargestellt sind die Geschwindigkeitsverläufe aller 24 Probanden (jede Linie stellt den Geschwindigkeitsverlauf eines Probanden dar).

⁴ Die Teststrecke ist eine gekürzte Variante der Teststrecke für Studie III bestehend aus dem Abschnitt „Außerorts 1“ und dem Abschnitt „Stadt 2“.

3.2.2.3 Versuchsanordnung

Bei dem Versuch handelt es sich um eine einfaktorielle abhängige Versuchsanordnung. Der Innersubjektfaktor ist zweistufig und umfasst die beiden oben beschriebenen Pedallösungen (CPS vs. SPS). Alle Probanden durchfuhren die Teststrecke mit beiden Pedallösungen. Der Versuch fand im Anschluss an einen anderen Versuch statt, in welchem die Probanden bereits in fünf 20-minütigen Fahrten mit dem kombinierten Fahrbremspedal fuhren. Daher wurde zum einen auf eine Eingewöhnungsfahrt verzichtet und zum anderen begannen alle Fahrer die erste Fahrt mit der konventionellen Pedallösung (SPS). Auf diese Weise war der Einfluss des Wechsels von einer Pedallösung zur anderen und deren Effekte für alle Fahrer gleich.

3.2.2.4 Ablauf und Befragung

Die Fahrer wurden vor jeder Fahrt instruiert, so effizient wie möglich zu fahren, indem sie sich an drei Regeln halten sollten:

1. Vermeiden Sie, wenn möglich, hydraulisches Bremsen!
2. Segeln Sie so häufig wie möglich!
3. Vermeiden Sie den roten Bereich der Leistungsanzeige im Kombiinstrument⁵!

Jeder Fahrer absolvierte zwei Fahrten, eine mit der gewöhnlichen Pedallösung (SPS) und eine mit dem kombinierten Fahrbremspedal. Nach jeder Fahrt wurden die Fahrer befragt:

- Wie gut ist es Ihnen gelungen, energieeffizient zu fahren?
- Wie gelungen ist die Pedallösung, um energieeffizient zu fahren?

Die Fragen wurden anhand der 15-stufigen Kategorienunterteilungsskala nach Heller (1985) beantwortet. Nach der zweiten Fahrt fand erneut eine kurze Befragung statt, in der die Probanden sich frei zu den Pedallösungen äußern, Positives und Negatives aufzählen und einen Favoriten benennen sollten. Im Anschluss erhielt jeder Proband eine Testfahrerentschädigung und wurde entlassen.

3.2.3 Ergebnisse

3.2.3.1 Fahrverhalten

Die Analyse der Fahrverhaltensparameter zeigt, dass die Pedalvariante einen signifikanten Einfluss auf das Fahrverhalten hatte. Das kombinierte Fahrbremspedal führte zu einer energieeffizienteren Fahrweise im Hinblick auf fast alle untersuchten Parameter (vgl. Tabelle 2). Mit CPS wurde im Mittel signifikant langsamer gefahren und schwächer positiv beschleunigt. Während es keinen Unterschied bzgl. der mittleren Verzögerung (RB + HB) gab, wurde mit CPS signifikant stärker elektrisch verzögert als mit SPS. Die rekuperative Bremse wurde hierbei mit beiden Varianten gleichermaßen lange genutzt, allerdings mit kombiniertem Fahrbremspedal effektiver, denn gleichzeitig wurde mit CPS weniger lang die hydraulische Bremse genutzt als mit SPS. Die hydraulische Bremse ist allerdings in beiden Versuchsbedingungen im Mittel nur etwa ein Prozent der Zeit genutzt worden. Weiterhin wurde mit CPS im Vergleich zu SPS tendenziell weniger Zeit gesegelt.

⁵ Roter Bereich der Leistungsanzeige entspricht einer Leistung von mehr als 40 kW.

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Fahrverhaltensparameter mit Ergebnissen von *t*-Tests für abhängige Stichproben. UV: Pedallösung.

Parameter	CPS M (SD)	SPS M (SD)	Statistik
Mittl. Geschwindigkeit	49.62 (2.74)	53.16 (2.67)	$t(23) = -7.26, p < .001, \eta_p^2 = .696$
SD Geschwindigkeit	22.42 (1.45)	23.39 (1.48)	$t(23) = -3.99, p = .001, \eta_p^2 = .408$
Mittl. Beschleunigung ($ax > 0$)	0.49 (0.06)	0.51 (0.07)	$t(23) = -2.17, p = .040, \eta_p^2 = .170$
Mittl. Verzögerung ($ax < 0$; RB + HB)	-0.43 (0.07)	-0.43 (0.06)	$t(23) = 0.45, p = .657, \eta_p^2 = .009$
Mittl. Verzögerung ($ax < 0$; nur RB)	-0.41 (0.07)	-0.33 (0.03)	$t(23) = -6.00, p < .001, \eta_p^2 = .610$
% der Zeit HB genutzt	0.55 (0.81)	1.68 (0.70)	$t(23) = -5.60, p < .001, \eta_p^2 = .577$
% der Zeit RB genutzt	25.76 (2.34)	24.58 (5.42)	$t(23) = 1.15, p = .264, \eta_p^2 = .054$
% der Zeit gesegelt	16.57 (4.99)	20.01 (6.55)	$t(23) = 1.83, p = .080, \eta_p^2 = .127$

3.2.3.2 Verbrauch

Mit CPS wurde im Vergleich zur Fahrt mit SPS signifikant weniger Energie verbraucht, $t(23) = 65.99, p < .001, \eta_p^2 = .669$ (vgl. Abbildung 20 links). Abbildung 20 rechts zeigt eine Aufspaltung des Verbrauches in entnommene und rekuperierte Energie. Die Addition beider Werte ergibt den Verbrauch, wie in Abbildung 20 links dargestellt. Die Auswertung zeigt, dass mit CPS zwar tendenziell mehr Energie entnommen, $t(23) = 1.96, p = .062, \eta_p^2 = .144$, allerdings auch signifikant mehr Energie rekuperiert wurde, $t(23) = 7.34, p < .001, \eta_p^2 = .701$.

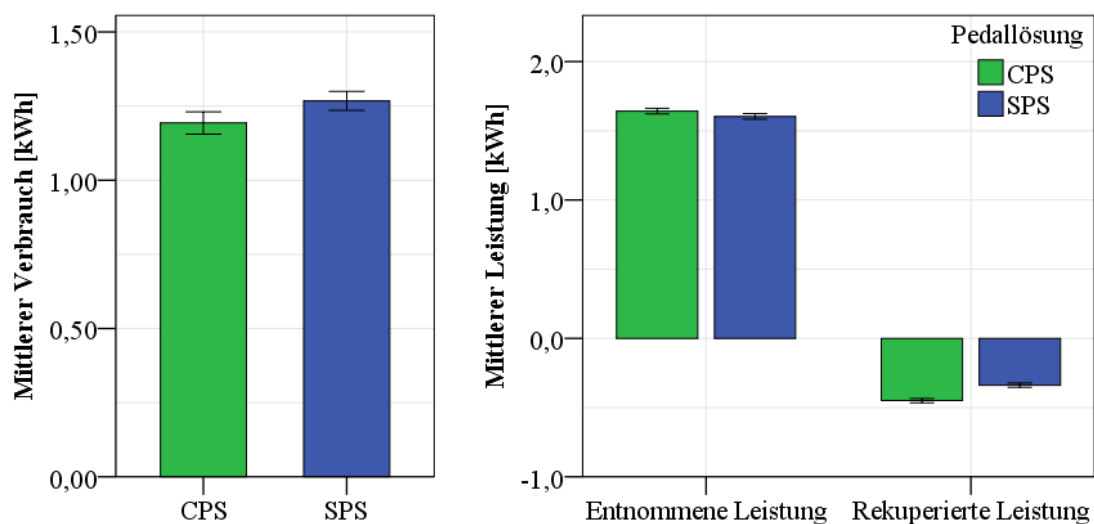


Abbildung 20: Verbrauch (links) und Leistung, die der Batterie entnommen und zugeführt wurde (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

Abbildung 21 zeigt den Anteil der Zeit, in dem ein bestimmter Leistungswert abgerufen wurde. Im Vergleich zu CPS wurde mit SPS länger mit geringerer Leistung, während mit CPS länger mit höherer Leistung rekuperiert wurde. Dies zeigt, warum trotz vergleichbarer Rekuperationsdauer (siehe Fahrverhaltensanalyse), mit CPS im Vergleich zu SPS effektiver rekuperiert wurde. Worauf diese Unterschiede zurückzuführen sind, wird im

nächsten Kapitel dargestellt. Auch für die entnommene Leistung gibt es erkennbare Unterschiede: Mit CPS wurde, verglichen mit SPS, länger eine geringe Leistung abgerufen, während eine eher hohe Leistung länger mit SPS abgerufen wurde.

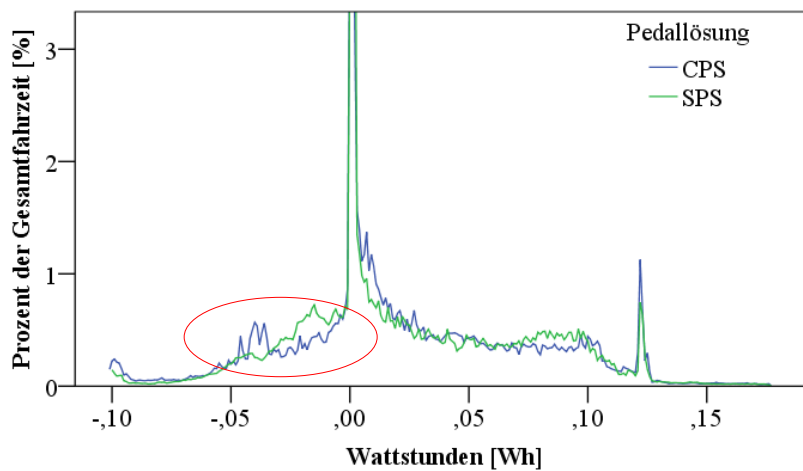


Abbildung 21: Prozent der Zeit, in der ein bestimmter Leistungswert abgerufen wurde. Dargestellt ist der Mittelwert über alle Fahrer und die gesamte Fahrt. Aus Gründen der Anschaulichkeit ist der Prozentwert für den Segelbereich abgeschnitten worden. Der rote Kreis kennzeichnet den Bereich, in dem der Effekt der Pedalvariante auf die rekuperierte Energie deutlich wird.

3.2.3.3 Situationsspezifische Auswertung

Die situationsspezifische Auswertung gibt Aufschluss darüber, in welchen Situationen die Pedallösung einen Effekt auf den Verbrauch hatte. Zu diesem Zweck ist eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung mit den Faktoren „Pedallösung“ (CPS vs. SPS) und „Situation“ (46 Stufen) durchgeführt worden, die folgende Ergebnisse erbrachte:

- Haupteffekt Pedallösung, $F(1, 23) = 46.54, p < .001, \eta_p^2 = .669$.
- Haupteffekt Situation, $F(45, 1035) = 1115.46, p < .001, \eta_p^2 = .980$.
- Interaktionseffekt Pedallösung x Situation, $F(45, 1035) = 2.88, p < .001, \eta_p^2 = .111$.

Der signifikante Interaktionseffekt zeigt, dass nicht in allen Situationen gleichermaßen mit CPS weniger als mit SPS verbraucht wurde. In insgesamt elf Situationen wurde signifikant und in drei weiteren tendenziell signifikant weniger Energie mit CPS als mit SPS verbraucht. In einer Situation wurde mit SPS weniger Energie verbraucht als mit CPS. Einen Überblick über diese Situationen und deren Charakteristika zeigt Tabelle 3. Im Folgenden wird die Analyse des Fahrverhaltens auf Situationsebene berichtet, um Aufschluss über die Ursachen der Verbrauchsunterschiede zu erhalten. Für jede der dreizehn Situationen wurden der Geschwindigkeits-, Beschleunigungspedal- und Bremspedalverlauf sowie die Parameter mittlere Geschwindigkeit, Beschleunigung, aus der Batterie entnommene und rekuperierte Energie für jede Pedallösung ausgewertet. Der Übersichtlichkeit wegen werden diese Ergebnisse im Folgenden zusammenfassend dargestellt und anhand einer Situation im Detail veranschaulicht.

Tabelle 3: Situationen, für die sich ein signifikanter Effekt der Pedallösung auf den Verbrauch (Summe) ergeben hat. Situation 1-14: CPS < SPS. Letzte Situation: CPS > SPS.

Situation		Statistik (kWh)	Gezeigtes Fahrverhalten
1. Start	AOS	$t(23) = -2.55; p = .018$	Starkes Beschleunigen
2. Erster LS-Abschnitt 70 km/h	AO71	$t(23) = -2.58; p = .017$	Starkes Beschleunigen
3. Erste Scharfe Rechtskurve	SRK1	$t(23) = -2.86; p = .009$	Beschleunigen
4. Erste Scharfe Linkskurve	SLK1	$t(23) = -2.73; p = .012$	Schwaches Verzögern
5. Dritter LS-Abschnitt 70 km/h	AO73	$t(23) = -7.27; p < .001$	Verzögern
6. Fünfter LS-Abschnitt 100 km/h	AO105	$t(23) = -3.65; p = .001$	Schwaches Verzögern
7. Erstes Steiles Gefälle	SDL1	$t(23) = -2.04; p = .053$	Durch Gefälle Aufnehmen von Fahrt
8. Siebter LS-Abschnitt 100 km/h	AO107	$t(23) = -1.75; p = .093$	Anfängliches Beschleunigen, dann Verzögern
9. Steiler Anstieg mit 70 km/h	SUL7	$t(23) = -2.85; p = .009$	Langes Beschleunigen und kurzes Verzögern zum Schluss
10. Kuppe	AO52	$t(23) = -2.04; p = .053$	Halten der Geschwindigkeit, schwaches Verzögern
11. Ortsbeginn	OB	$t(23) = -1.78; p = .088$	Verzögern
12. Zweiter 50 km/h-IO-Abschnitt	IO52	$t(23) = -2.21; p = .038$	Verzögern
13. Vierter 50 km/h-IO-Abschnitt	IO54	$t(23) = -2.50; p = .020$	Starkes Verzögern
14. Ortsausgang	OE	$t(23) = -2.94; p = .007$	Vernachlässigung wegen Lerneffekt
15. Zweite scharfe Rechtskurve IO	IOSRK2	$t(23) = 3.05; p = .006$	Schwaches Beschleunigen

Situationen, in denen mit CPS weniger Energie verbraucht wurde als mit SPS

Die Situation „Ortsausgang“ (vgl. Tabelle 3 Situation 14) war die letzte Situation beider Fahrten und bleibt unberücksichtigt, da hier vermutlich Lerneffekte auftraten: In der zweiten Fahrt verzögerten Fahrer schon frühzeitig, ehe die Situation beendet war, da sie wussten, dass die Fahrt danach beendet war. Für die verbleibenden Situationen zeigt sich, dass in den Situationen, in denen mit CPS weniger Energie verbraucht wurde als mit SPS, mit CPS tendenziell langsamer gefahren und schwächer beschleunigt oder stärker verzögert wurde (siehe Abbildung 22). Ursächlich für die geringeren mittleren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ist ein Verhalten, dass in nahezu allen Situationen (4-13) aus Tabelle 3 beobachtet werden konnte und im Folgenden erläutert wird.

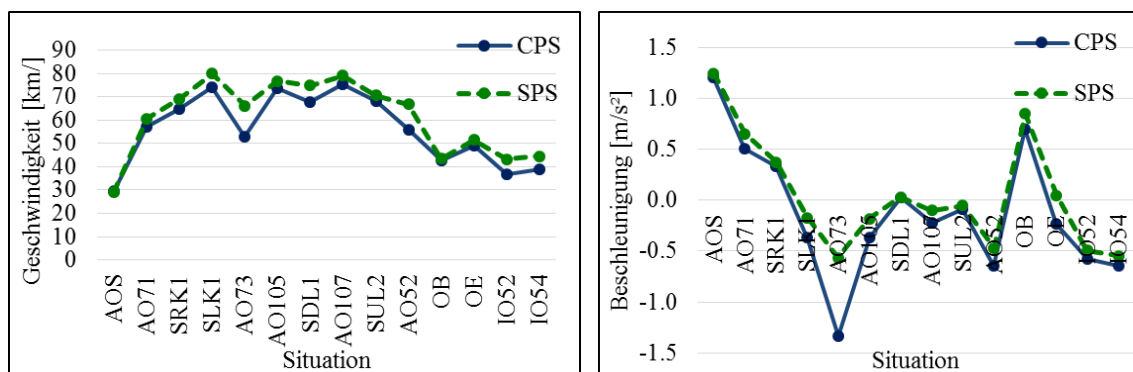


Abbildung 22: Geschwindigkeit (links) und Beschleunigung (rechts) für die in Tabelle 3 genannten Situationen. Dargestellt sind Mittelwerte.

Bei den Situationen 4-13 handelt es sich um Situationen, in denen zum Teil oder durchgehend verzögert wird. In allen diesen Situationen ist die Energiebilanz mit CPS günstiger als mit SPS, weil in der Summe mehr Energie rekuperiert wurde (vgl. hierzu Tabelle 22 im Appendix mit den jeweiligen Teststatistiken). Dem wiederum liegt ein Verhalten zugrunde, dass von allen Probanden unabhängig von der Pedallösung gleichermaßen gezeigt wurde, aber aufgrund der unterschiedlichen Pedallösungen zu anderen Effekten führte: Sobald sich Probanden einer Geschwindigkeitsbegrenzung näherten, lösten sie mehrheitlich das Beschleunigungspedal und leiteten so die Verzögerung ein. Mit SPS wird mit gelöstem Beschleunigungspedal zunächst nur gesegelt, während mit CPS bereits maximal rekuperiert wird. Die Zeit, welche die Fahrer mit SPS brauchten, um den Fuß auf das Bremspedal zu stellen und ebenfalls zu verzögern (und somit zu rekuperieren), ist der erste Grund dafür, dass mit SPS weniger Energie rekuperiert wurde. Fahrer in der SPS-Bedingung begannen darüber hinaus zunächst schwach zu rekuperieren und schöpften die maximale Rekuperation im Vergleich zu CPS (wenn überhaupt) erst deutlich später aus. Das hatte zur Folge, dass Fahrer in der CPS-Bedingung bereits bei tendenziell höheren Geschwindigkeiten begannen maximal zu rekuperieren, während mit SPS bei höheren Geschwindigkeiten erst schwach und bei geringeren Geschwindigkeiten stärker rekuperiert wurde. Da aber mit sinkenden Geschwindigkeiten auch das Rekuperationsvermögen sinkt (vgl. Abbildung 3 in Kapitel 2.2.2 „Regeneratives vs. hydraulisches Bremsen“), stellt dieses Verhalten den zweiten Grund dafür dar, warum mit SPS weniger Energie rekuperiert wurde. Zusammenfassend führt das Zusammenspiel aus tendenziell späterem und gleichzeitig schwächerem Rekuperieren in der SPS-Bedingung dazu, dass mit SPS weniger Energie rekuperiert wurde.

Im Folgenden wird dieses Verhalten beispielhaft an der Situation „Landstraße Tempo 70“ veranschaulicht (Situation 5 in Tabelle 3). Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, wurde in dieser Situation wegen der Geschwindigkeitsbegrenzung (50 km/h) in der darauffolgenden Situation verzögert. Mit SPS wird in dieser Situation im Mittel signifikant schneller gefahren, $t(23) = -7,48, p < .001$, und weniger stark verzögert, $t(23) = -9.36, p < .001$. Die meisten Fahrer lösten in beiden Bedingungen vollständig das Beschleunigungspedal (vgl. Abbildung 24); mit SPS sogar schon tendenziell früher als mit CPS. Während aber mit CPS früher maximal rekuperieren wurde, ist mit SPS zunächst gesegelt und erst tendenziell später begonnen worden zu rekuperieren. Wie in Abbildung 25 rechts zu sehen ist, wurde die Rekuperation mit SPS langsam aufgebaut und das Maximum (gekennzeichnet durch

die schwarze Markierung) wurde in vielen Fällen nicht erreicht. Die Folge ist, dass mit SPS signifikant weniger Energie rekuperiert wurde, $t(23) = -10.23$, $p < .001$, und dadurch in der Summe mit CPS signifikant weniger Energie verbraucht wurde.

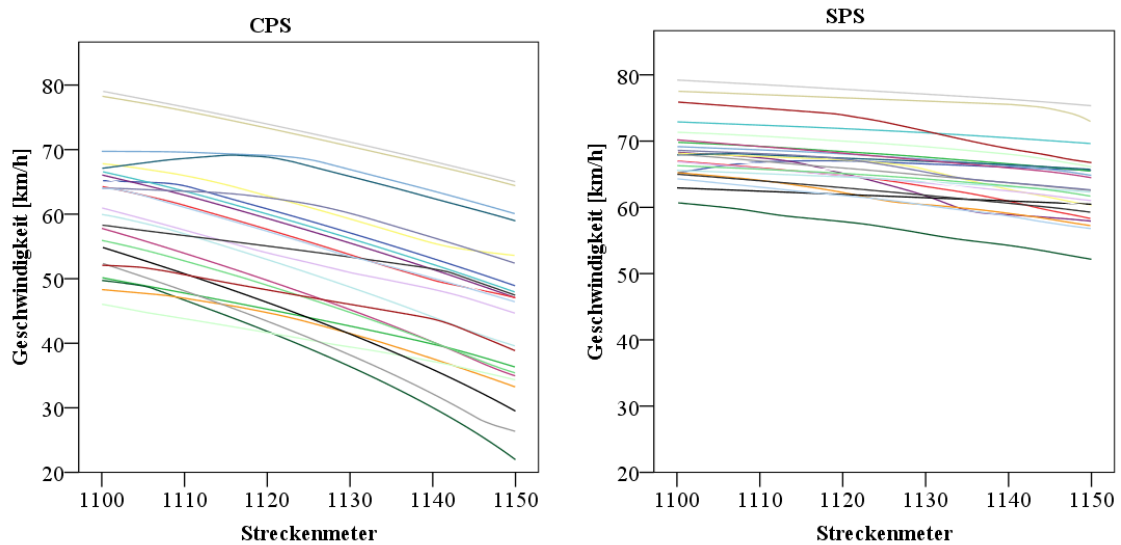


Abbildung 23: Geschwindigkeitsprofile aller Probanden in der Situation 'Landstraße Tempo 70' in der Bedingung CPS links und SPS rechts.

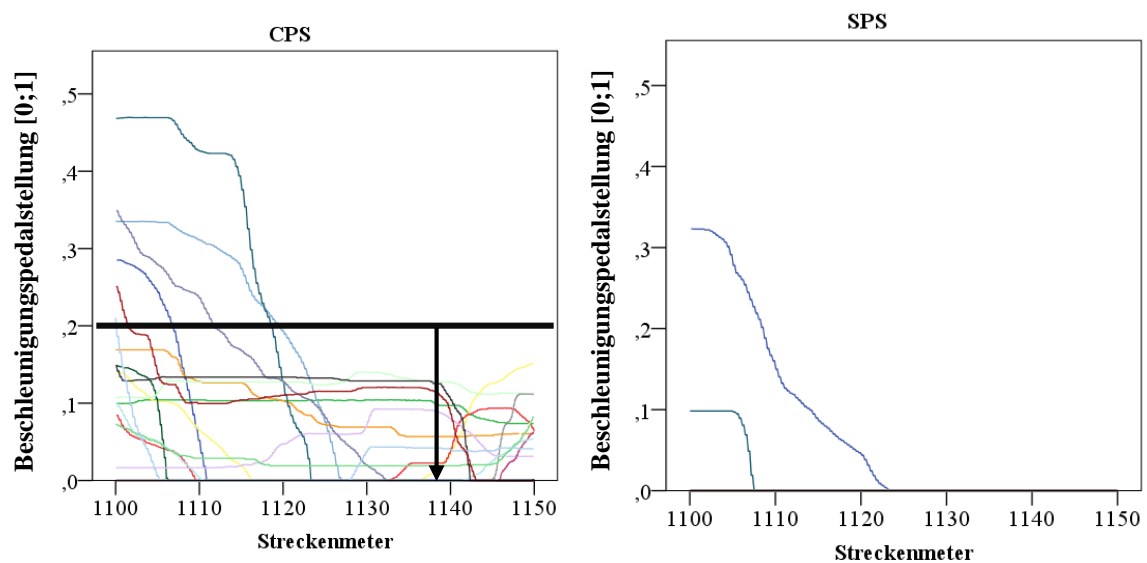


Abbildung 24: Profile aller Probanden in der Situation 'Landstraße Tempo 70' für die Beschleunigungspedalstellung abhängig von der Pedallösung. Der schwarze Strich zeigt, in welchem Bereich rekuperiert wird (0.0-0.2). Die Spitze des Pfeils zeigt, wo die maximale Rekuperation abgerufen wird. Mit SPS haben nur zwei Probanden das Beschleunigungspedal betätigt, weswegen keine 24 Linien zu sehen sind.

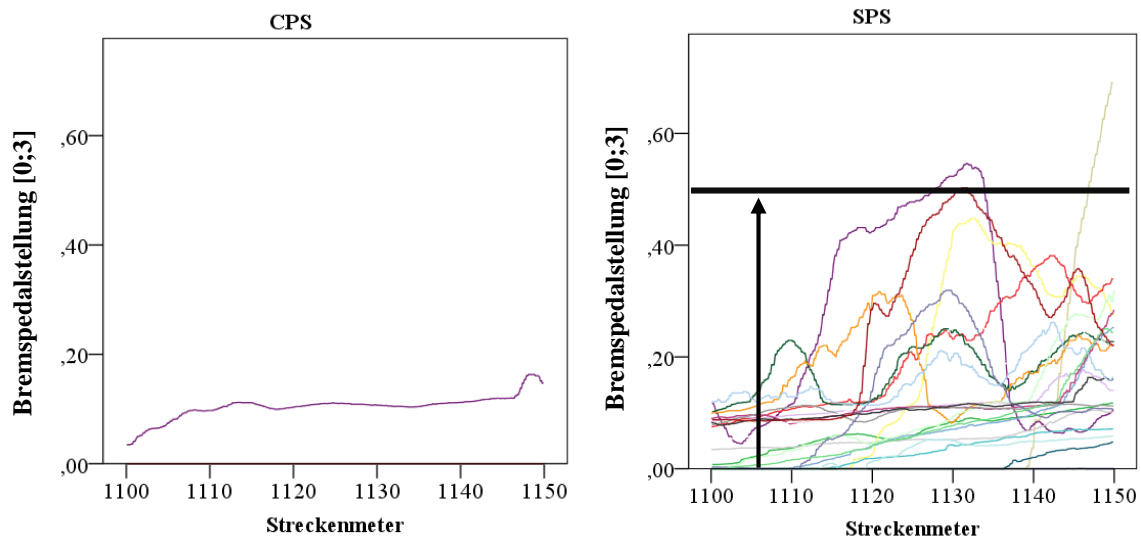


Abbildung 25: Profile aller Probanden in der Situation 'Landstraße Tempo 70' für die Bremspedalstellung abhängig von der Pedallösung. Der schwarze Strich zeigt, in welchem Bereich rekuperiert wird (0.0-0.5). Die Spitze des Pfeils zeigt, wo die maximale Rekuperation abgerufen wird. Mit CPS hat nur ein Proband das Bremspedal betätigt, weswegen keine 24 Linien zu sehen sind.

Die Situationen 1-3 in Tabelle 3 unterscheiden sich von den restlichen Situationen dahingehend, dass in diesen Situationen ausschließlich beschleunigt wurde. Mit CPS ist hier signifikant langsamer gefahren und schwächer beschleunigt worden. Dies führte in den drei aufeinanderfolgenden Situationen maßgeblich zu einer günstigeren Energiebilanz mit CPS (vgl. hierzu Tabelle 22 im Appendix). Warum mit CPS schwächer beschleunigt wurde als mit SPS, konnte abschließend nicht erklärt werden.

Situation, in der mit CPS mehr Energie verbraucht wurde als mit SPS

Die Situation in der mit CPS mehr Energie als mit SPS verbraucht wurde, war die zweite scharfe Kurve innerorts. Vor der Kurve als auch nach der Kurve lag die Geschwindigkeitsbegrenzung bei 50 km/h. Anschließend folgt das Ortsende. Mit SPS wurde zwar tendenziell schneller gefahren, $t(23) = -1.78$, $p = .089$, aber im Mittel schwächer beschleunigt, $t(23) = 3.46$, $p = .002$ und weniger Energie aus der Batterie entnommen, $t(20) = 3.25$, $p = .004$. Wie in Abbildung 26 zu sehen ist, verhielten sich die Fahrer in derselben Situation unterschiedlich: Während mit CPS eher beschleunigt wurde, begannen die Fahrer mit SPS nach kurzer Zeit zu verzögern. Wieso sich das Verhalten in dieser Situation für die beiden Pedallösungen unterscheidet, kann nicht abschließend geklärt werden. Möglicherweise handelt es sich um einen Lerneffekt.

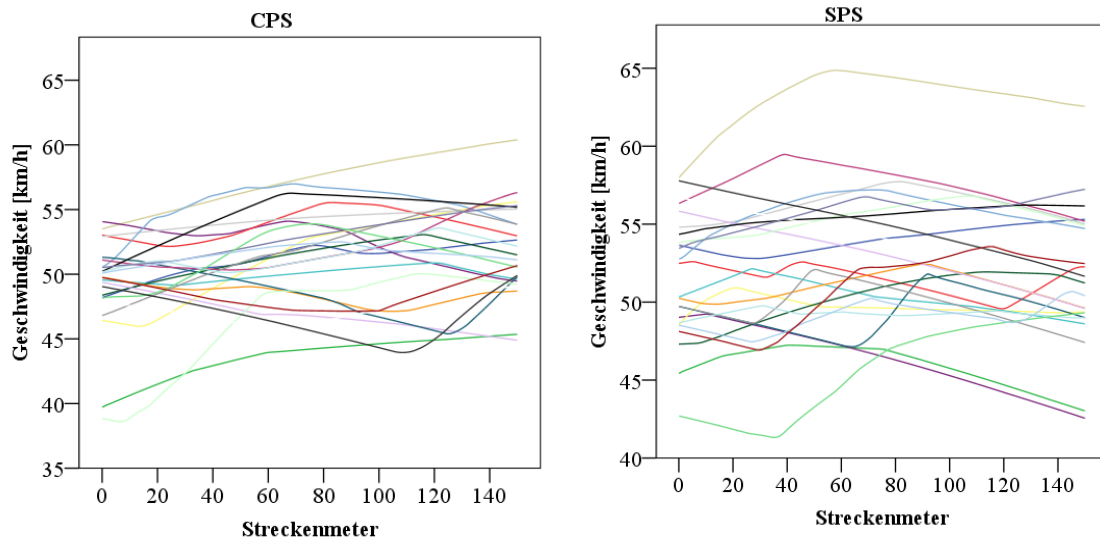


Abbildung 26: Geschwindigkeitsprofile aller Fahrer in der Situation 'Scharfe Rechtskurve innerorts' in der Bedingung CPS links und SPS rechts.

3.2.3.4 Fahrertypenanalyse

Überprüft wurde, ob es einen Interaktionseffekt von Fahrertypen mit einer der beiden Pedalvarianten auf den Verbrauch gibt. Hierzu wurde der Verbrauch in der SPS-Bedingung (die hier als Referenz betrachtet wurde; siehe Abbildung 27 links) herangezogen und anhand des Medians, der bei 1.26 kWh lag, zwei Gruppen gebildet, nämlich tendenziell effiziente und tendenziell sportliche Fahrer.

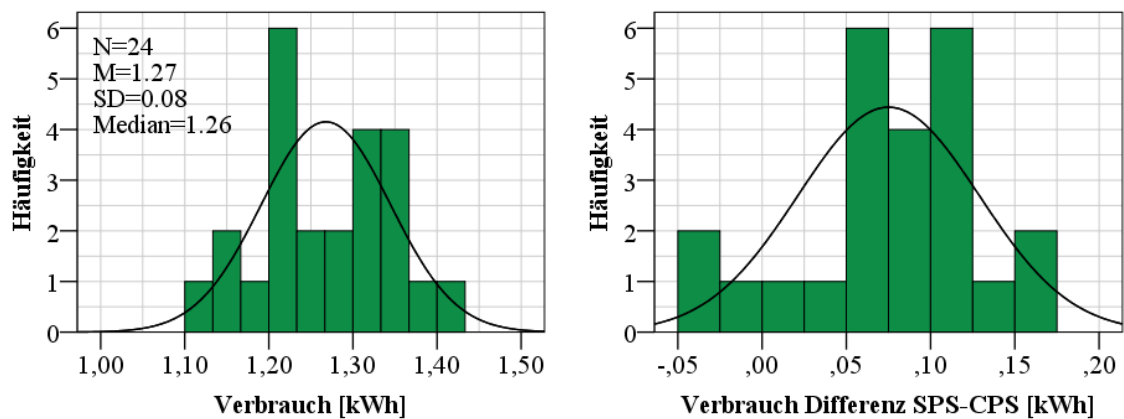


Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung des Verbrauches mit SPS (links) und der Differenzen des Verbrauches von SPS und CPS (rechts).

Eine Vergleich beider Gruppen ergab, dass tendenziell ineffiziente Fahrer im Schnitt signifikant schneller fahren (dies gilt auch für die CPS-Fahrt; SPS: $t(22) = -2.35$, $p = .014$; CPS: $t(22) = -2.75$, $p = .012$) und im Mittel tendenziell stärker beschleunigten, $t(22) = -1.65$, $p = .113$. Abbildung 27 rechts zeigt die Verteilung der Verbräuche, wenn ein Differenzwert gebildet wird (SPS-CPS). Ein positiver Wert bedeutet, dass ein Fahrer mit CPS weniger Energie verbraucht hat; ein negativer Wert bedeutet, dass mit SPS weniger Energie verbraucht wurde. Nahezu alle Fahrer verbrauchten mit CPS weniger als mit SPS. Abbildung 28 zeigt, dass die Fahrer beider Gruppen gleichermaßen ihren Verbrauch mit CPS verbesserten, $t(22) = 0.63$, $p = .625$, $\eta_p^2 = .011$.

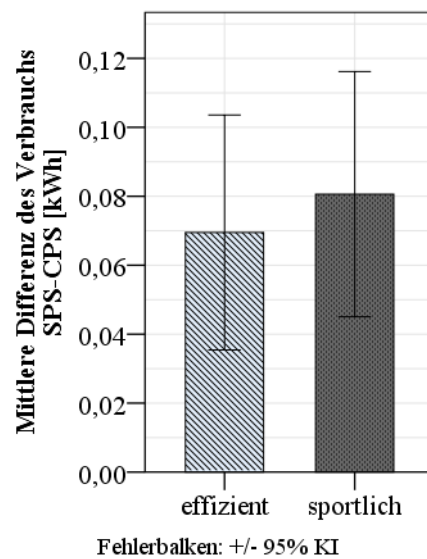


Abbildung 28: Differenz des Verbrauches (SPS-CPS). Dargestellt sind Mittelwerte und 95 %-Konfidenzintervalle.

3.2.3.5 Befragungsdaten

Sowohl die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit als auch der wahrgenommene Nutzen waren für das kombinierte Fahrbremspedals hoch. Die Fahrer gaben an, dass es ihnen besser gelungen ist, mit CPS energieeffizient zu fahren, $t(23) = 6.59$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .654$ (s. Abbildung 29 links), und dass CPS signifikant geeigneter war, energieeffizient zu fahren als SPS, $t(23) = 9.04$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .780$ (s. Abbildung 29 rechts).

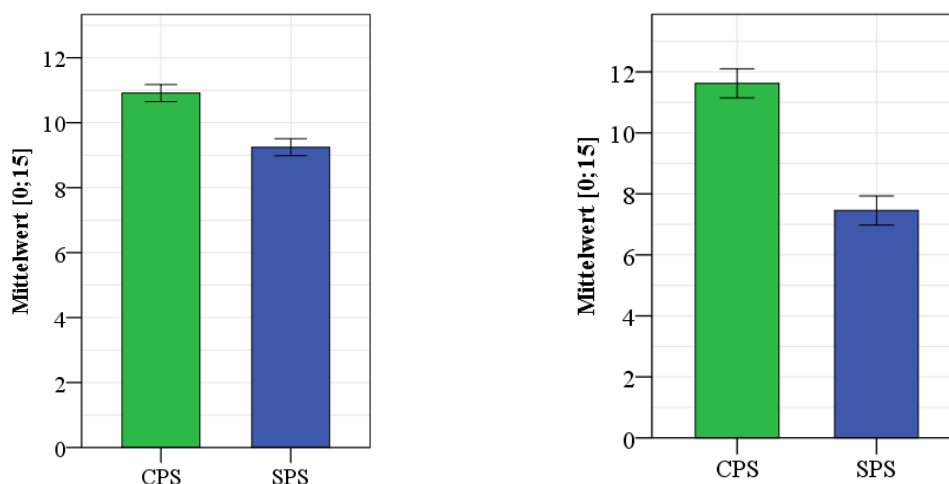


Abbildung 29: Urteile der Fahrer zur Benutzerfreundlichkeit („Wie gut ist es mit dieser Pedallösung gelungen energieeffizient zu fahren?“; links) und zur Nützlichkeit („Wie geeignet ist die Pedallösung, energieeffizient zu fahren?“; rechts). Dargestellt sind Mittelwerte und 95 %-Konfidenzintervalle.

Auf die Frage hin, welche Pedalvariante sie bevorzugen, gaben 23 von 24 Fahrern die kombinierte Fahrbremspedal-Variante an. Gründe dafür sind laut Fahrern:

- + bequem, da man nur ein Pedal benötigt
- + intuitiv
- + rekuperative Bremse rekuperiert voll, wenn man das Beschleunigungspedal löst
- + Klarheit darüber, in welchem Bereich die rekuperative Bremse liegt

Negativ im Vergleich zur SPS-Variante fanden die Fahrer vor allem:

- Schwierigkeit, den Segelpunkt zu finden.
- Notwendigkeit, auf Leistungsanzeige zu blicken, um Segelpunkt zu finden. Dies wurde als ablenkend empfunden.

3.2.4 Diskussion

Befunde in der Literatur legen eine hohe Akzeptanz und schnelle Erlernbarkeit eines kombinierten Fahrbremspedals, bei dem die rekuperative Bremse statt auf dem Bremspedal auf dem Beschleunigungspedal implementiert wird, dar. Eine Validierung des Nutzens zur Förderung von Eco-Driving sowie der Akzeptanz einer derartigen Pedallösung im Vergleich zu einer konventionellen Pedalvariante war bisher ausgeblieben. Die erste Studie hatte daher zum Ziel, den Einfluss eines kombinierten Fahrbremspedals im Vergleich zu einer konventionellen Pedallösung auf das Fahrverhalten, die Energieeffizienz und die Akzeptanz zu untersuchen. Hierzu durchfuhren alle Fahrer eine Teststrecke mit beiden Pedallösungen im bewegten Fahrsimulator und bewerteten diese anschließend.

Die Ergebnisse zeigen, dass das kombinierte Fahrbremspedal maßgeblich zu einer Steigerung der Energieeffizienz beiträgt, indem es das Fahrverhalten optimiert. Insbesondere das verbesserte Rekuperationsverhalten steigerte die Energieeffizienz. Hierbei spielten zwei Punkte maßgeblich eine Rolle: Verzögerungsvorgänge wurden unabhängig von der Pedalbedingung mit dem Lösen des Beschleunigungspedals eingeleitet. Abhängig von der Pedallösung erzeugte dies unterschiedliche Effekte: Mit einem kombinierten Fahrbremspedal wurde durch das vollständige Lösen des Beschleunigungspedals maximal rekuperiert, mit der Pedalvariante, bei der die Rekuperationsfunktion auf dem Bremspedal implementiert war, wurde hingegen beim vollständigen Lösen des Beschleunigungspedals gesegelt. Mit kombiniertem Fahrbremspedal wurde daher früher begonnen maximal zu rekuperieren, während mit der anderen, konventionellen Pedalvariante beim Wechsel von Beschleunigungs- zu Bremspedal „Rekuperationszeit“ verloren ging. Hinzu kommt, dass mit der konventionellen Pedallösung die maximale Rekuperation wenn überhaupt nur zögerlich aufgebaut wurde. Da das Fahrzeug in dieser Zeit bereits langsamer wird und die generelle Rekuperationsleistung abnimmt, wurde wiederum weniger Energie rekuperiert. Fahrsituationen, in denen mit kombiniertem Fahrbremspedal weniger Energie verbraucht wurde als mit der konventionellen Pedallösung, waren daher vorwiegend solche, in denen verzögert wurde. Dieses Verhalten ist nicht nur aus Eco-Driving-Sicht interessant, sondern könnte auch in sicherheitskritischen Situationen von Vorteil sein. Mit kombiniertem Fahrbremspedal würde sofort eine Bremsung eingeleitet und die Reaktionszeiten könnten

somit verkürzt werden. Dies gilt es jedoch in weiterführenden Untersuchungen zu bestätigen.

Ferner wurde mit einem kombinierten Fahrbremspedal die hydraulische Bremse seltener genutzt. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen von Vattenfall GmbH (2011) und Cocron et al. (2013). Weiterhin wurde schwächer beschleunigt, langsamer und gleichmäßiger gefahren (zu sehen an einer kleineren Standardabweichung der Geschwindigkeit). Eine Erklärung für die Optimierung weiterer für Eco-Driving relevanter Fahrverhaltensweisen ist weder aus den objektiven noch subjektiven Daten ersichtlich, jedoch als positiv zu bewerten. Einzig wurde mit kombiniertem Fahrbremspedal weniger gesegelt, als mit der konventionellen Pedalvariante. Dieser Effekt war allerdings zu erwarten, da mit getrennter Pedallösung der Segelzustand einfacher zu erreichen ist, nämlich indem man beide Pedale löst.

Unklar war, ob tendenziell ineffiziente Fahrer mit der kombinierten Fahrbremspedallösung vergleichbar viel Energie einsparen würden wie tendenziell effiziente Fahrer. Es wurde erwartet, dass sportliche Fahrer, die schneller fahren und somit bei höheren Geschwindigkeiten zu rekuperieren beginnen in der Summe weniger Energie verbrauchen, weil sie mehr Energie rekuperieren als effiziente Fahrer. Zwar wird von ineffizienteren Fahrern in der Tat mehr Energie rekuperiert, gleichzeitig wird allerdings auch mehr Energie aus der Batterie entnommen. Aus diesem Grund konnten beide Fahrergruppen (gemessen an ihrem Verbrauch mit der getrennten Pedallösung) in gleicher Weise die Energieeffizienz steigern.

Anders als in der Studie von Cocron et al. (2013) hat kein Fahrer Probleme bezüglich der Bedienung der neuartigen Pedalerie angesprochen. Stattdessen wurde von einer schnellen Gewöhnung und einer intuitiven Bedienung der Pedalerie berichtet. Die Akzeptanz sowie der wahrgenommene Nutzen und die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit des kombinierten Fahrbremspedals waren zufriedenstellend. Dies deckt sich wiederum mit den Befunden von Turrentine et al. (2011) und Vattenfall GmbH (2011). Kritisiert wurde allerdings die Notwendigkeit häufiger Tachoblicke, um zu sehen, ob das Fahrzeug gerade beschleunigt, segelt oder rekuperiert. In Situationen wie beispielsweise „bergab fahren“ war das zum Teil nicht zweifelsfrei bestimmbar, trotz Bewegung des Fahrsimulators. An dieser Stelle wären weiterführende Studien im Realfahrzeug sinnvoll, um zu erörtern, inwiefern die Eigenschaften des Simulators das Erkennen des jeweiligen Modus beeinträchtigen oder ob ein haptisches oder weiteres visuelles Signal (beispielsweise via eines Head-up-Displays) sinnvoll wäre, um den Segelbereich erkennbarer zu gestalten.

Abschließend führen die Ergebnisse der vorliegenden Studie zu einer uneingeschränkten Empfehlung eines kombinierten Fahrbremspedals im Gegensatz zu einer Pedalvariante, bei der mit dem Bremspedal rekuperiert wird, aufgrund der fahrstilunabhängigen Energieeffizienzsteigerung durch Verbesserung des Rekuperationsverhaltens und aufgrund der hohen Akzeptanz.

3.3 STUDIE II: DIE STÄRKE DER REKUPERATIVEN BREMSE⁶

3.3.1 Fragestellung

Aufgrund der Ergebnisse der ersten Studie wird ein kombiniertes Fahrbremspedal gegenüber einer getrennten Pedallösung empfohlen. Die Analyse des Fahrverhaltens und des Verbrauches zeigte, dass durch eine effektive Rekuperation und seltenere Nutzung der hydraulischen Bremse die Energieeffizienz signifikant gesteigert werden konnte. Auch die Akzeptanz war aufgrund der Möglichkeit die Mehrzahl der Verkehrssituationen mit nur einem Pedal zu durchfahren hoch. Dies ist unter anderem deshalb möglich, weil die maximale Rekuperation des kombinierten Fahrbremspedals zu einer maximalen Verzögerung von -2.0 m/s^2 führte. Zum Vergleich: Bei Verlassen des Beschleunigungspedals in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor beträgt das Schlepptomment -0.5 m/s^2 (Nirschl, Blum, & Kopf, 1999).

Die maximale Rekuperation des kombinierten Fahrbremspedals, wie es in Studie I untersucht wurde, entspricht der maximal möglichen Rekuperation des verwendeten Simulationsmodells. Die maximale Rekuperation kann aber auch verringert werden. Das Ziel der zweiten Studie war, zu evaluieren, wie stark die Rekuperation maximal sein sollte, um einerseits eine wirksame Veränderung des Fahrverhaltens und andererseits eine zufriedenstellende Akzeptanz zu erzielen. Eine starke Rekuperation ist theoretisch dadurch zu begründen, dass auf diese Weise viel Energie in die Batterie zurückgeführt wird. Dass sich dies günstig auf die Energiebilanz auswirkt, zeigen die Ergebnisse der ersten Studie sowie Clarke et al. (2010). Zudem kann aufgrund einer stärkeren Rekuperation die Mehrzahl unkritischer Verkehrssituationen ohne Zuhilfenahme des hydraulischen Bremspedals durchfahren werden. Dies wurde von den Probanden in Studie I aber auch von Cocron (2014) berichtet. Andererseits wird erwartet, dass mit einer starken Rekuperation in manchen Situationen stärker als nötig verzögert wird und dies stärkeres oder längeres anschließendes Beschleunigen zur Folge hat. Ein solches Verhalten ist ineffizient und soll beispielsweise durch vorausschauendes Fahren vermieden werden. Möglicherweise könnte eine schwächere Rekuperation dieses Verhalten abschwächen und zu einem gleichmäßigeren Fahren beitragen. Dies wiederum, könnte zu einer größeren Akzeptanz gegenüber starken Rekuperationen beitragen.

In der Literatur gibt es bisher keine Studien, die eine optimalen Rekuperationsstärke zur Förderung von Eco-Driving evaluieren und verschiedene rekuperative Bremsstärken diesbezüglich systematisch gegenüberstellen. Verzögerungen, die im Alltag benötigt und erlebt werden, liefern daher einen ersten Anhaltspunkt, welche Rekuperationsstärken von Fahrern akzeptiert oder bevorzugt werden. Für die Gestaltung der Rekuperationsvarianten wurden diese daher in der vorliegenden Studie berücksichtigt. Auf Bundesstraßen werden im Mittel zwischen -0.49 m/s^2 und -0.75 m/s^2 , auf Landstraßen zwischen -0.22 m/s^2 und

⁶ Die hier berichteten Daten wurden unter anderem im Rahmen eines „Praktikums zur Verkehrspsychologischen Forschung“ (Rittger, 2011) erhoben. Die Ideen zur Versuchsplanung und -durchführung stammen vom Autor der vorliegenden Arbeit. Die hier dargestellten Daten wurden neu ausgewertet, neu dargestellt und nicht aus der Arbeit von Rittger (2011) entnommen. Diese Studie ist in Teilen bereits veröffentlicht (Schmitz et al., 2013)

-0.31 m/s², in Wohngebieten zwischen -0.87 m/s² und -0.95 m/s² und innerstädtisch zwischen -0.76 m/s² und -0.85 m/s² erlebt. Der untere Wert trifft hierbei für normale/entspannte Fahrer und der obere für zügig fahrende zu (Schumacher, 2001). Diese Werte wurden mit Realfahrzeugen auf einer repräsentativen Teststrecke mit zwei unterschiedlichen Instruktionen erhoben. Die Ergebnisse zeigen, dass generell höhere Verzögerungen in städtischen Gebieten gemessen werden und eher niedrige Verzögerungen in ländlichen Gebieten. Weiterhin hängen Verzögerungen von der gefahrenen Geschwindigkeit ab. Bei Geschwindigkeiten zwischen 25-30 km/h werden Verzögerungen von -1.5 bis -2.7 m/s² gemessen. Bei Anfahrtsgeschwindigkeiten zwischen 35-40 km/h werden bereits Verzögerungen von -1.7 bis -3.2 m/s² gemessen. Diese Werte beziehen sich allerdings ausschließlich auf vom Fahrer geplante Anhaltevorgänge bis zum Stillstand beispielsweise aufgrund einer roten Ampel (Nickel, 2001; Nickel & Hugemann, 2003). Dies erklärt die höheren Werte im Vergleich zu Schumacher (2001). Nicht weiter erwähnt sind hier Notstoppsituationen, die um ein Vielfaches höhere Verzögerungen hervorrufen können als die oben beschriebenen Werte.

Eberl (2014) untersuchte in einer Simulatorstudie die Auswirkung verschiedener Schleppmomente eines kombinierten Fahrbremspedals im Elektroauto auf das Fahrerleben. Die Ergebnisse zeigen, dass besonders hohe Schleppmomente (-2.3 m/s²) positiv bewertet worden sind, da die Probanden dadurch das Gefühl hatten mehr Energie zu rekuperieren, mehr Kontrolle über das Fahrzeug zu haben und direkt auf das Fahrverhalten Einfluss nehmen zu können. Allerdings ist die Präferenz der Schleppmomentstärke in der Studie von Eberl (2014) von Fahrern und Fahrsituationen abhängig. Eberl (2014) empfiehlt deshalb, Fahrern die Möglichkeit zu geben, die Rekuperationsstärke zu bestimmen (situations- oder fahrerabhängig), um die Akzeptanz und den Nutzen zu erhöhen. Dies untersuchte er in einem weiteren Simulatorversuch. Über einen Regler konnte das Schleppmoment individuell eingestellt werden. Die Möglichkeit wurde auch entsprechend des persönlichen Geschmacks und der Fahrsituation genutzt und als positiv bewertet. Bezugnehmend auf das kombinierte Fahrbremspedal, wie es in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, indiziert dieses Ergebnis die Verwendung einer starken Rekuperation, da auf diese Weise weiterhin die Möglichkeit, schwächer rekuperativ zu bremsen, besteht. Eine Untersuchung der Energieeffizienz abhängig von der gewählten Schleppmomentstärke fehlt allerdings in der Studie von Eberl (2014).

Im Mitsubishi i-MiEV kann der Fahrer beispielsweise aus drei Fahrgängen mit unterschiedlich starken Rekuperationen wählen (Mitsubishi Motors Corporation, 2016). Beim BMW MINI E beträgt die Rekuperation maximal 0.3 g und entspricht somit einer maximalen Verzögerung von ca. -2.9 m/s² (MINI Media Information, 2008). Die Rekuperationsleistung nimmt beim BMW Mini E mit zunehmender Geschwindigkeit ab. Dies kann möglicherweise mit dem durchschnittlich erlebten bzw. benötigten Verzögerungen innerorts und außerorts begründet werden. In der Studie von Eberl (2014), in denen die Probanden die Rekuperationsstärke nach Wunsch und Situation adaptieren konnten, zeigte sich, dass beispielsweise auf Autobahnen bei hohen Geschwindigkeiten geringe Schleppmomente genutzt wurden, während im Stadtgebiet bei viel Verkehr, aber auch auf der Autobahn bei viel Verkehr, bevorzugt das stärkste Schleppmoment gewählt wurde.

Die Literaturrecherche zeigt, dass starke Rekuperationen akzeptiert und von Autoherstellern angeboten werden. Es fehlen allerdings empirische Studien, die belegen, dass eine starke Rekuperation im Vergleich zu einer schwächeren Rekuperation Eco-Driving wirksam und akzeptabel fördern kann. Aus diesem Grund habe ich drei Varianten eines kombinierten Fahrbremspedals mit verschiedenen rekuperativen Bremsstärken in das Simulationsmodell implementiert und untersucht, welche Rekuperationsstärke Eco-Driving wirksamer fördern kann und von den Fahrern bevorzugt wird. Da die im Folgenden beschriebene Studie im Rahmen einer Vorstudie stattfand, kam eine vergleichsweise kleine Stichprobe zum Einsatz.

3.3.2 Methoden

3.3.2.1 Die Stärken der rekuperativen Bremse

Für die Studie wurden drei verschiedene Rekuperationsstärken in das Simulationsmodell implementiert, wie in Abbildung 30 dargestellt ist. Die schwächste rekuperative Bremse mit -200 Nm entspricht einer maximalen Verzögerung von -1.0 m/s^2 , die mittlere Bremse mit -350 Nm entspricht einer maximalen Verzögerung von -1.3 m/s^2 und die stärkste Bremse mit -675 Nm entspricht einer maximalen Verzögerung von -2.0 m/s^2 .

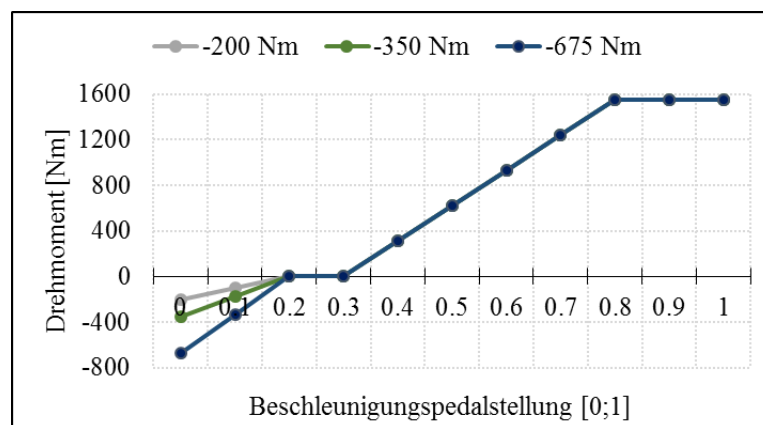


Abbildung 30: Kennlinien der drei Varianten eines kombinierten Fahrbremspedals mit unterschiedlichen Rekuperationsstärken.

Die schwächste Variante sollte dabei die gängigen mittleren Verzögerungen abdecken können (bis zu -1 m/s^2). Die nächststärkere Variante (bis zu -1.3 m/s^2) wurde im Zuge von Vortests bestimmt und sollte sich subjektiv deutlich von der schwächsten und stärksten Variante unterscheiden. Die stärkste Bremsvariante war die vom Simulationsmodell höchst mögliche und gleichzeitig auch diejenige, die in der ersten Studie Verwendung fand (bis zu -2.0 m/s^2).

3.3.2.2 Die Teststrecke

Die Teststrecke der zweiten Studie glich in weiten Teilen der Teststrecke der ersten Studie. Unterteilt ist auch diese Strecke in einen Außerorts- und einen Innerortsabschnitt und hat eine Gesamtlänge von 14.3 Kilometern. Neben unterschiedlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen umfasst die Teststrecke zahlreiche Kurven, Stoppsituationen sowie Anstiege und Gefälle. Abbildung 31 zeigt das Geschwindigkeitsprofil der Teststrecke.

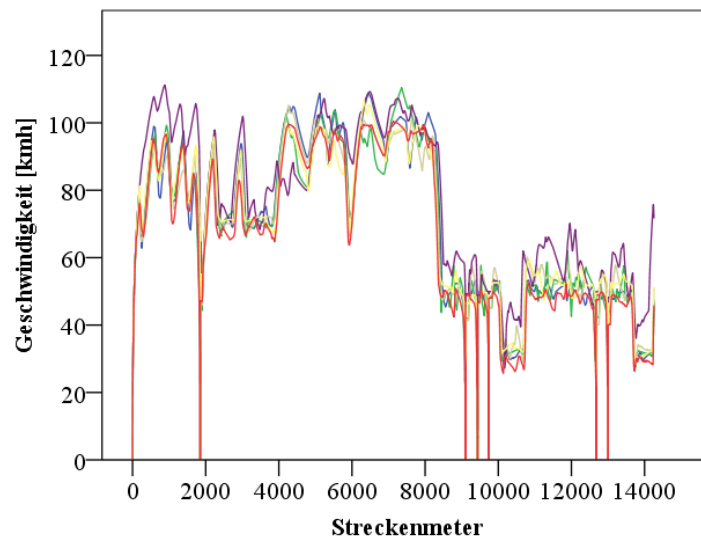


Abbildung 31: Das Geschwindigkeitsprofil der Strecke. Jede Linie stellt den Geschwindigkeitsverlauf eines der sechs Probanden dar.

3.3.2.3 Versuchsanordnung

Bei dem Versuch handelt es sich um eine 3x2-faktorielle abhängige Versuchsanordnung. Der erste Faktor ist die Stärke der rekuperativen Bremse (-200 Nm vs. -350 Nm vs. -675 Nm). Der zweite Faktor ist die Fahrstilinstruktion (sportlich/zügig vs. entspannt). Jeder Testfahrer durchfuhr die Teststrecke sechs Mal in der Reihenfolge wie in Abbildung 32 zu sehen ist. Grund hierfür war zum einen die vergleichsweise kleine Stichprobe (N=6), die eine permutierte und ausbalancierte Reihenfolge nicht erlaubte. Zum anderen sollte Simulator-Sickness aufgrund der langen Versuchsdauer vorgebeugt werden. Zu beachten ist, dass keiner der teilnehmenden Probanden vorher mit dem Elektrofahrzeugmodell gefahren war, welches sich in seiner Dynamik von dem bisher bekannten Fahrzeugmodell des WIVW-Fahrsimulators unterschied. Daher begannen alle Fahrer den Versuch mit der Versuchsbedingung, die am wenigsten dynamisch war, nämlich mit der Instruktion „entspannt“ mit schwacher Rekuperation, um sich an die neue Dynamik langsam zu gewöhnen.



Abbildung 32: Reihenfolge der sechs Fahrten. E = Instruktion „entspannt“; Z = Instruktion „zügig“. Zahl steht für die jeweilige Stärke der rekuperativen Bremse in Nm.

3.3.2.4 Ablauf und Befragung

Der Versuch dauerte 2.5 Stunden. Nachdem die Testfahrer eine kurze Einführung in die Spezifika von Elektrofahrzeugen hinsichtlich der rekuperativen Bremse und der damit verbundenen Rekuperationsfähigkeit erhalten hatten, lernten sie das kombinierte Fahrbremspedal in einer Eingewöhnungsfahrt kennen. Im Anschluss durchfuhr jeder Proband insgesamt sechs Mal die gleiche Teststrecke. Die Probanden wurden abwechselnd instruiert sportlich oder entspannt unter Beachtung der Verkehrsregeln zu fahren. Nach

jedem Durchgang erfolgte eine kurze Befragung. Die Probanden wurden gebeten dem Fahrzeug mit der entsprechenden Rekuperationsstärke und in Kombination mit dem instruierten Fahrstil eine Note zu geben (gemäß deutscher Schulnoten: 1-6). Darüber hinaus sollten sie auch mit Schulnoten bewerten, wie geeignet das jeweilige Fahrzeug in der jeweiligen Versuchsbedingung dazu war, in den Stillstand zu verzögern, bergab zu fahren, die Geschwindigkeit konstant zu halten und die Geschwindigkeit zu reduzieren (beispielsweise vor Kurven oder Geschwindigkeitsbegrenzungen). Im Anschluss an die letzte Fahrt wurden die Fahrer in einem offenen Interview gefragt, wie sie die unterschiedlichen Rekuperationsstärken abschließend bewerten.

3.3.2.5 Messparameter

Zusätzlich zu den bekannten Fahrverhaltensparametern wurde der Anteil der Zeit bestimmt, in dem Fahrer Energie aus der Batterie entnommen und demnach beschleunigt haben (über die gesamte Fahrt hinweg). Entsprechend ist aus diesem Parameter auch zu entnehmen, wieviel Zeit die Fahrer verzögert haben, da für die Berechnung des Parameters Standzeiten exkludiert wurden.

3.3.3 Ergebnisse

3.3.3.1 Fahrverhalten

Mit allen drei Varianten des kombinierten Fahrbremspedals fuhren die Probanden vergleichbar schnell, beschleunigten und verzögerten gleichermaßen stark und segelten vergleichbar lang (siehe Tabelle 4). Auch hatte die Stärke der rekuperativen Bremse keinen Einfluss auf die Standardabweichung der Geschwindigkeit. Die Rekuperationsstärke hatte aber einen Einfluss auf das Verzögerungsverhalten (vgl. hierzu Tabelle 5). Je stärker die rekuperative Bremse war, desto stärker verzögerten die Probanden im Mittel mit dieser und nutzten die hydraulische Bremse entsprechend weniger. Je schwächer die rekuperative Bremse war, desto mehr bremsten die Probanden hydraulisch. Die Probanden bremsten umso länger mit der rekuperativen Bremse, je schwächer die rekuperative Bremse war.

Tabelle 4: Mittelwerte und Standardabweichungen für diverse Fahrverhaltensparameter mit Ergebnissen von Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor „Stärke der rekuperativen Bremse“.

Parameter	-200 Nm	- 375 Nm	-675 Nm	Varianzanalyse
Mittl. Geschwindigkeit	59.14 (2.97)	59.01 (4.03)	59.18 (3.84)	$F(2, 10) = 0.06, p = .946,$ $\eta_p^2 = .011$
SD Geschwindigkeit	24.42 (1.02)	24.21 (1.01)	24.73 (0.86)	$F(2, 10) = 2.88, p = .103,$ $\eta_p^2 = .366$
Mittl. Beschl. (ax>0)	0.52 (0.06)	0.52 (0.07)	0.52 (0.03)	$F(2, 10) = 0.01, p = .986,$ $\eta_p^2 = .003$
Mittl. Verzög. (ax<0; RB + HB)	-0.45 (0.04)	-0.43 (0.06)	-0.44 (0.07)	$F(2,10) = 0.35, p = .346,$ $\eta_p^2 = .191$
Mittl. Verzög. (ax<0; nur RB)	-0.28 (0.02)	-0.31 (0.03)	-0.37 (0.03)	$F(2, 10) = 36.20; p < .001,$ $\eta_p^2 = .879$
% der Zeit RB genutzt	24.47 (0.83)	20.37 (1.31)	17.39 (0.85)	$F(2, 10) = 97.45; p < .001,$ $\eta_p^2 = .951$
% der Zeit HB genutzt	5.66 (1.42)	2.56 (0.69)	1.20 (0.86)	$F(2, 10) = 32.89, p < .001,$ $\eta_p^2 = .868$
% der Zeit gesegelt	13.29 (4.82)	13.69 (4.32)	14.84 (5.26)	$F(2, 10) = 0.66; p = .540,$ $\eta_p^2 = .116$

Tabelle 5: Ergebnissen von post-hoc t-Tests für abhängige Stichproben für die Fahrverhaltensparameter, auf die der Faktor „Stärke der rekuperativen Bremse“ einen signifikanten Effekt hatte.

Parameter	-200 Nm vs. -350 Nm	-200 Nm vs. -675 Nm	350 Nm vs. -675 Nm
Mittl. Verzög. (nur EB)	t(5) = 3.09, p = .027	t(5) = 12.77, p < .001	t(5) = 4.20, p = .008
% der Zeit EB genutzt	t(5) = 8.47, p < .001	t(5) = 14.70, p < .001	t(5) = 5.34, p = .003
% der Zeit HB genutzt	t(5) = 4.91, p = .004	t(5) = 6.22, p = .002	t(5) = 6.80, p = .001

In Abbildung 33 wird die Nutzung des kombinierten Fahrbremspedals veranschaulicht. Wie zu sehen ist, wählten die Fahrer mit schwächer werdender Rekuperation verstärkt eine Pedalstellung, welche (entsprechend der jeweiligen Bedingung) die maximale Rekuperation anforderte (0-10 % des Pedalweges). Mit schwacher rekuperativer Bremse wurde also dazu tendiert, maximal möglich zu rekuperieren, während mit der stärksten rekuperativen Bremse eher auch Mittelstellungen im Rekuperationsbereich gewählt wurden. In der Bedingung mit stärkster rekuperativer Bremse adaptieren die Fahrer ihr Pedalverhalten entsprechend der rekuperativen Bremsstärke. Weiterhin wurde mit zunehmender Rekuperationsstärke länger Energie im niedrigen positiven Drehmomentbereich entnommen (0-310 Nm; entspricht einer Pedalstellung von 30-40 %). Dieses Ergebnis führte zu der Untersuchung eines weiteren Parameters.

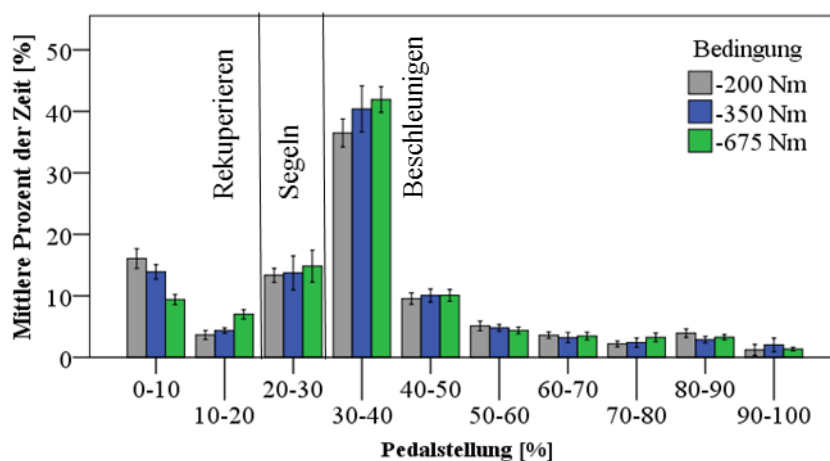


Abbildung 33: Prozent der Zeit, in der eine bestimmte Pedalstellung gewählt wurde. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

Abbildung 34 zeigt, dass mit zunehmender Stärke der rekuperativen Bremse länger im niedrigen Drehmomentbereich (Pedalstellung 30-40 %) beschleunigt und kürzer verzögert wurde. Zur Erinnerung: Die Rekuperationsstärke hatte keinen Einfluss auf die mittlere positive Beschleunigung.

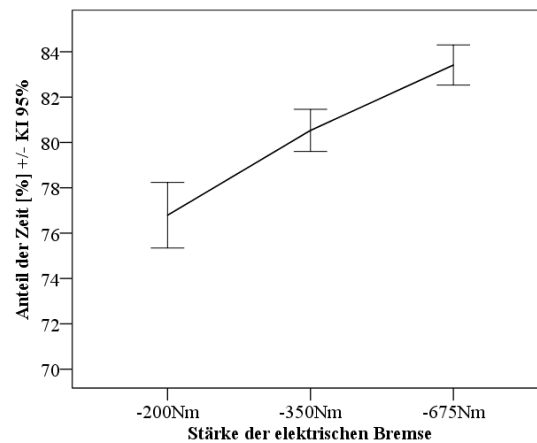


Abbildung 34: Anteil der Zeit (über die gesamte Fahrt betrachtet), in der beschleunigt wurde. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen. Ergebnisse von Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Faktor „Stärke der rekuperativen Bremse“ und post-hoc t-Tests für abhängige Stichproben: $F(2, 10) = 72.91, p < .001, \eta_p^2 = .936$; Post hoc: -200 vs. -350: $t(5) = -7.89, p = .001$; -200 vs. -675: $t(5) = -12.37, p < .001$; -350 vs. -675: $t(11) = -4.53, p = .006$.

3.3.3.2 Verbrauch

Die Stärke der rekuperativen Bremse hatte einen signifikanten Effekt auf den Verbrauch (vgl. Tabelle 6). Wie in Abbildung 35 links zu sehen ist, war der Verbrauch mit der schwächsten rekuperativen Bremsstärke am höchsten, während der Verbrauch mit mittlerer und stärkster rekuperativer Bremse vergleichbar war. Abbildung 35 rechts zeigt die Aufteilung der Leistung in entnommene und der Batterie zugeführte Leistung. Mit stärker werdender rekuperativer Bremse wurde mehr Energie aus der Batterie entnommen. Dieser Effekt verfehlt allerdings die Signifikanz. Gleichzeitig wurde mit zunehmender Rekuperationsstärke signifikant mehr Energie rekuperiert (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Ergebnisse von Varianzanalysen mit Messwiederholung sowie von t-Tests für abhängige Stichproben. UV: Rekuperative Bremsstärke. AVn: Verbrauchsparameter.

Parameter	Varianzanalyse	Post-hoc
Verbrauch (Summe)	$F(2, 10) = 15.98, p = .001, \eta_p^2 = .762$	-200 vs. -350: $t(5) = 3.95, p = .011$; -200 vs. -675: $t(5) = 6.97, p = .001$; -350 vs. -675: $t(5) = -0.34, p = .746$
Entnommene Energie	$F(2, 10) = 3.86, p = .057, \eta_p^2 = .436$	
Rekuperierte Energie	$F(2, 10) = 39.89, p < .001, \eta_p^2 = .889$	-200 vs. -350: $t(5) = 8.28, p < .001$; -200 vs. -675: $t(5) = 7.01, p = .001$; -350 vs. -675: $t(5) = 2.20, p = .077$

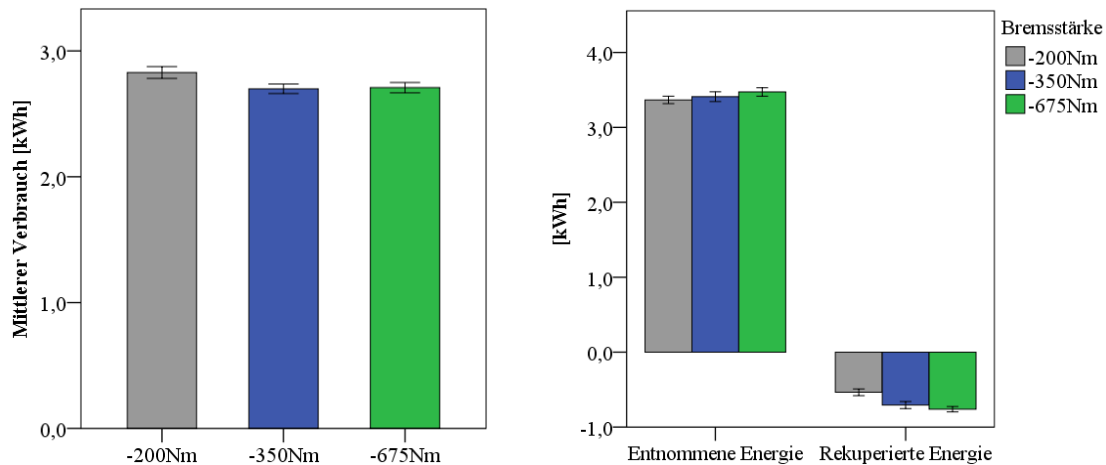


Abbildung 35: Verbrauch (links) und Leistung, die der Batterie entnommen und zugeführt wurde (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

3.3.3.3 Situationsspezifische Auswertung

Um situationsspezifische Effekte der Rekuperationsstärken zu untersuchen, erfolgte eine Analyse des Verbrauches auf Situationsebene. Eine Varianzanalyse mit den beiden Messwiederholungsfaktoren „Situation“ und „rekuperative Bremsstärke (RB)“ ergab für beide Faktoren einen signifikanten Effekt sowie eine signifikante Interaktion (HE „Situation“: $F(51, 255) = 205.58, p < .001, \eta_p^2 = .976$; HE „RB“: $F(2, 10) = 525.88, p < .001, \eta_p^2 = .991$; Interaktion „Situation“ x „RB“: $F(102, 1122) = 151.63, p < .001, \eta_p^2 = .968$). Eine weiterführende Post-hoc-Analyse ergab für insgesamt zehn Situationen einen signifikanten Effekt der rekuperativen Bremsstärke auf den Verbrauch (vgl. hierzu Tabelle 23 im Anhang für Teststatistiken). Tabelle 7 zeigt eine Auflistung dieser Situationen, deren Charakteristika und mit welcher Bedingung am wenigsten Energie verbraucht worden ist. Die Analyse der Fahrverhaltens- und Verbrauchsparameter auf Situationsebene ergab, dass sich die Verbräuche in den Bedingungen -350 Nm und -675 Nm nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die beiden stärkeren Bremsvarianten bewirkten vor allem in Situationen, in denen zum Teil oder abschließend verzögert wurde eine günstigere Energiebilanz, wie in Stoppsituationen oder beim Verzögern auf ein Geschwindigkeitslimit. Die schwächste RB-Variante bewirkte vor allem in Situationen, in denen nach einer Verzögerung wieder beschleunigt wurde, wie Kurvensituationen, eine günstigere Energiebilanz. Eine detaillierte Auflistung der untersuchten Fahrverhaltensparameter für jede Bedingung ist in Tabelle 23 im Anhang zu finden.

Tabelle 7: Auflistung der Situationen, für die es einen signifikanten Effekt der rekuperativen Bremsstärke auf den Verbrauch gab.

Situationen, in denen mit schwächster rekuperativer Bremse am wenigsten Energie verbraucht wurde	Situationen, in denen mit mittlerer und stärkster rekuperativer Bremse am wenigsten Energie verbraucht wurde
- Scharfe Rechtskurve: Zunächst wird vor der Kurve verzögert, anschließend aus der Kurve beschleunigt	- Außerorts 100er Abschnitt: Fahrer kommen von einer weiten Kurve und beschleunigen daher zunächst, verzögern anschließend vor einer scharfen Kurve
- Scharfe Linkskurve: Zunächst leichtes Verzögern vor der Kurve, anschließend wird aus der Kurve beschleunigt	- Außerorts 100er Abschnitt: Verzögern bei Anfahrt an Stoppschild
- Innerorts 50er Abschnitt: Dieser Streckenabschnitt ist eine Kuppe zwischen vorhergehendem Anstieg und nachfolgendem Gefälle. Situation ist charakterisiert durch Einpendeln der Geschwindigkeit auf 50 km/h	- Außerorts 100er Abschnitt: Fahrer kommen aus einer Kurve und beschleunigen daher zunächst, verzögern anschließend auf 70 km/h wegen einer Geschwindigkeitsbegrenzung
	- Außerorts 100er Abschnitt: Verzögern bei Anfahrt an Ortsbeginn
	- Innerorts 50er Abschnitt: Situation ist ein Verbindungsstück zwischen zwei Stoppsituationen. Es wird zunächst von Stoppsituation kommend beschleunigt und anschließendes bei Anfahrt an folgende Stoppsituation verzögert
	- Innerorts 50er Abschnitt: Von Stoppsituation kommend wird zunächst beschleunigt und anschließend wegen einer Temp-30 Geschwindigkeitsbegrenzung verzögert
	- Starkes, langes Gefälle Innerorts: Halten der Geschwindigkeit bei 50 km/h

3.3.3.4 Fahrertypenanalyse

In jeder Fahrt wurden die Fahrer instruiert, entweder sportlich oder entspannt zu fahren. Der Manipulationscheck zeigt einen signifikanten Effekt der Instruktion auf die mittlere Geschwindigkeit ($F(1, 5) = 19.49, p=.007$). Mit der Instruktion „sportlich“ ist in jeder Bedingung signifikant schneller gefahren worden als mit der Instruktion „entspannt“ (Post hoc: -200 Nm: $t(5) = -2.89, p=.034$; -350 Nm: $t(5) = -5.63, p = .002$; -675 Nm: $t(5) = -3.85, p = .012$).

Abbildung 36 zeigt den mittleren Verbrauch abhängig von Instruktion und Rekuperationsstärke. Beide Haupteffekte und auch die Interaktion werden signifikant (HE Instruktion: $F(1, 5) = 26.71, p = .004, \eta_p^2 = .842$; Haupteffekt RB: $F(2, 10) = 15.99, p = .004, \eta_p^2 = .762$; Interaktion I x RB: $F(2, 10) = 6.49, p = .044, \eta_p^2 = .565$). Mit der Instruktion „entspannt“ ist signifikant weniger Energie verbraucht worden als mit der Instruktion „sportlich“, und zwar in allen drei Bedingungen (-200 Nm: $t(5) = -4.09, p = .009$; -350 Nm: $t(5) = -7.74, p = .001$; -675 Nm: $t(5) = -3.22, p=.023$). Mit der Instruktion „entspannt“ wird mit allen drei Varianten der rekuperativen Bremse

vergleichbar viel Energie verbraucht ($F(2, 10) = 2.42, p = .139$). Mit der Instruktion „sportlich“ gibt es hingegen einen signifikanten Effekt der rekuperativen Bremsstärke auf den Verbrauch ($F(2, 10) = 44.19, p < .001$). Am wenigsten verbrauchten die „sportlich“ instruierten Fahrer, wenn sie mit der stärksten rekuperativen Bremse gefahren sind. Alle Post-hoc-Vergleiche werden signifikant: -200 Nm vs. -350 Nm: $t(5) = 5.04, p = .004$; -200 Nm vs. -675 Nm: $t(5) = 16.32, p < .001$; -350 Nm vs. -675 Nm: $t(5) = 2.59, p = .049$).

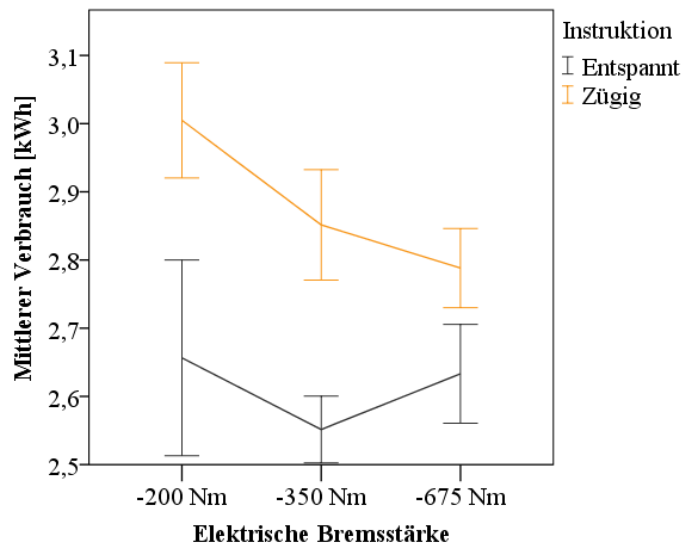


Abbildung 36: Verbrauch (Summe) abhängig von Instruktion und Stärke der rekuperativen Bremse. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

3.3.3.5 Befragungsdaten⁷

In der offenen Befragung am Ende jeder Fahrt und abschließend für den Versuch, gaben alle sechs Fahrer an, dass die schwächste rekuperative Bremse zu schwach gewesen sei. Als Begründung nannten die Fahrer, dass es schwer sei, diese richtig zu „dosieren“, man zusätzlich die hydraulische Bremse benötige und man länger zum Verzögern brauche, wenn man nur rekuperieren wolle (beispielsweise um in den Stillstand zu kommen). Im Vergleich zur schwächsten Rekuperation bewerteten alle sechs Probanden die mittlere Rekuperation als besser und angenehmer zu bedienen, da auf die hydraulische Bremse häufiger verzichtet werden konnte. Auch sagten die Fahrer, dass die Verzögerung durch die Rekuperation vergleichbar mit einem Schleppmoment im Verbrennungsfahrzeug sei. Die stärkste Rekuperation wurde zwar positiv bewertet, da auf die hydraulische Bremse verzichtet werden konnte, allerdings war sie drei Fahrern zu stark. Zwei weitere Fahrer bewerteten hingegen die stärkste Rekuperation insbesondere in Kombination mit dem zügigen Fahrstil als positiv.

⁷ Da die Annahme der Normalverteilung bei kleiner Stichprobe für die Benotung der rekuperativen Bremsstärken verletzt wurde, werden nichtparametrische Tests (Friedmann und Wilcoxon) durchgeführt. Aufgrund der kleinen Stichprobe werden nur für die abschließende Benotung statistische Tests durchgeführt und die verbleibenden Fragen deskriptiv ausgewertet.

Wie in Abbildung 37 links zu sehen ist, bewerteten die Fahrer das kombinierte Fahrbremspedal mit allen Rekuperationsstärken zum „In den Stillstand bremsen“ vergleichbar. In den Situationen „bergab fahren“, „Geschwindigkeit konstant halten“ und „Geschwindigkeit verringern“ gibt es kleine deskriptive Unterschiede. Für diese Aufgaben wurde die schwächste Rekuperationsstärke am besten bewertet. Die Instruktion hatte deskriptiv keinen Einfluss auf die Bewertung des kombinierten Fahrbremspedals (vgl. Abbildung 37 rechts).

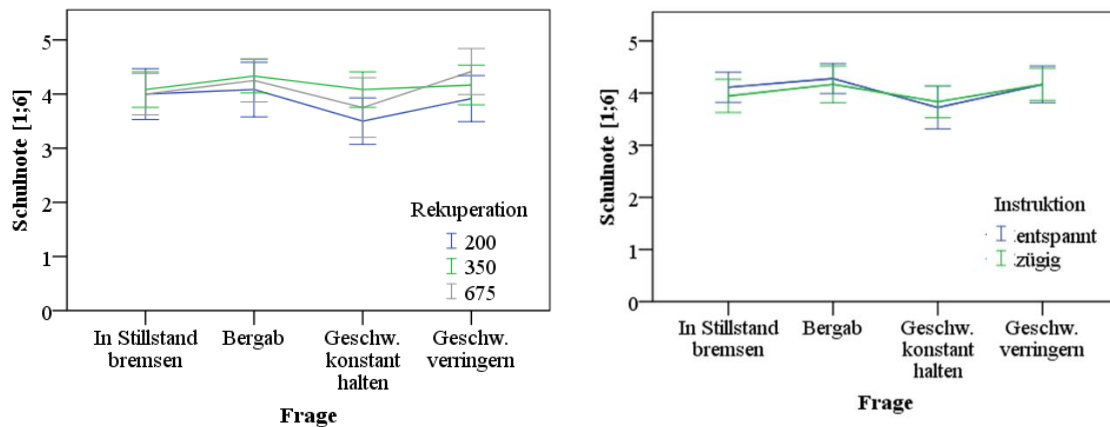


Abbildung 37: Urteile der Fahrer zur Benutzerfreundlichkeit abhängig von der Rekuperationsstärke (links) und Instruktion (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

Abbildung 38 zeigt die abschließende Bewertung der drei Varianten der rekuperativen Bremsstärken abhängig von der jeweiligen Instruktion. Es gibt einen signifikanten Effekt der rekuperativen Bremse auf die Note, $X^2(2) = 8,44$, $p = .015$ und keinen Effekt der Instruktion auf die Benotung, $Z = 0$, $p = 1,00$. Die beiden starken Bremsvarianten werden signifikant besser bewertet als die schwächste, wobei die mittlere und stärkste Variante vergleichbar bewertet werden (Post hoc: -200 Nm vs. -350 Nm: $Z(5) = -2,04$, $p = .041$; -200 Nm vs. -675 Nm: $Z(5) = -2,03$, $p = .042$; -350 Nm vs. -675 Nm: $Z(5) = -0,58$, $p = .564$).

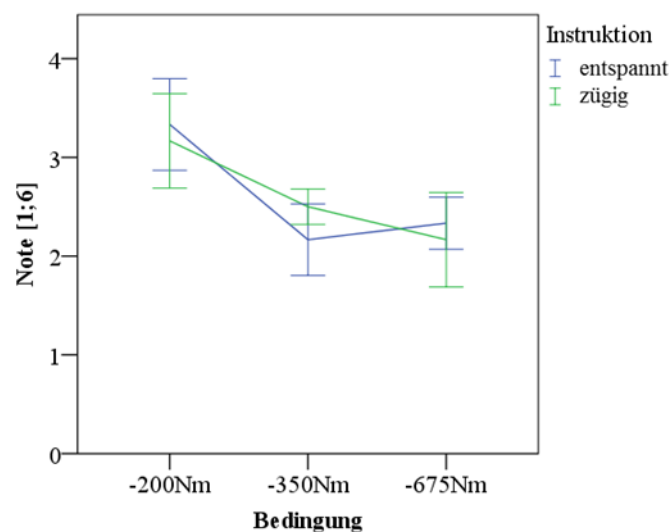


Abbildung 38: Urteil in deutschen Schulnoten. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

3.3.4 Diskussion

Das Ziel der zweiten Studie war zu untersuchen, ob eine starke Rekuperation bei Verwendung eines kombinierten Fahrbremspedals neben einer hohen Akzeptanz auch ein energieeffizientes Fahrverhalten bewirken kann oder ob eine schwache Rekuperation zu bevorzugen ist, da mit dieser gleichmäßigeres Fahren erwartet wird. Da diese Studie den Charakter einer Vorstudie hatte, nur eine kleine Stichprobe teilnahm und die Reihenfolge der Fahrten nicht permutiert und ausbalanciert war, werden signifikante Ergebnisse vorsichtig interpretiert und als Hinweise gedeutet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Stärke der rekuperativen Bremse vor allem das Verzögerungsverhalten beeinflusste. Mit stärker werdender rekuperativer Bremse wurde zunehmend rekuperativ und weniger hydraulisch verzögert und dadurch mehr Energie rekuperiert. Dies führte zu einer günstigeren Energiebilanz mit den beiden stärkeren rekuperativen Bremsen verglichen mit der schwächsten. Allerdings wurde mit stärker werdender rekuperativer Bremse auch länger beschleunigt und tendenziell mehr Energie aus der Batterie entnommen. Dies kann als Hinweis darauf gedeutet werden, dass aufgrund unnötig starker Bremsungen (mit starker rekuperativer Bremse) in bestimmten Situationen (s.u.) anschließend länger beschleunigt und deshalb mehr Energie aus der Batterie entnommen wurde. Auch wenn diese Ergebnisse darauf hindeuten, dass mit schwacher rekuperativer Bremse gleichmäßiger gefahren wurde und dies eine wichtige Eigenschaft von Eco-Driving ist, war die Energiebilanz mit stärkerer Rekuperation signifikant besser, weshalb stärkere Rekuperationen zur Unterstützung von Eco-Driving zu bevorzugen sind.

Die Ergebnisse der Situationsanalyse deuten darauf hin, dass mit den beiden stärkeren Rekuperationen im Vergleich zur schwächsten Rekuperation der Verbrauch in Situationen, in denen verzögert wurde, am geringsten war. In Situationen, in denen unmittelbar auf eine Verzögerung eine Beschleunigung folgte (beispielsweise Kurven), war der Verbrauch mit schwächster Rekuperation am geringsten. Diese Ergebnisse unterstützen die Vermutung, dass mit starker Rekuperation möglicherweise zu stark abgebremst wurde und im Nachhinein stärker beschleunigt werden musste, um die gewünschte Ausgangsgeschwindigkeit zu erreichen. Dies konnte anhand der objektiven Daten allerdings nicht abschließend bestätigt werden.

Weiterhin deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Fahrer, die instruiert waren effizient zu fahren, mit allen Rekuperationsstärken gleichermaßen wenig Energie verbrauchten, während Fahrer, die instruiert waren sportlich zu fahren, mit starker im Gegensatz zu einer schwachen Rekuperation ihren Verbrauch reduzieren konnten. Für „effizient-instruierte“ Fahrer deuten sich sogar im Gegensatz zu „sportlich-instruierten“ numerisch gegenläufige Verbräuche an, also eine leichte (wenngleich nicht signifikante) Tendenz, dass mit stärkerer rekuperativer Bremse mehr Energie verbraucht wird. Eine erste vorsichtige Erklärung hierfür ist, dass Fahrer, die instruiert waren effizient zu fahren, viel Energie rekuperieren und auf die hydraulische Bremse verzichten wollten. Möglicherweise, haben sie daher mit starker rekuperativer Bremse zu lange und zu stark rekuperiert und haben beispielsweise in Kurvensituationen anschließend mehr Energie aus der Batterie entnehmen müssen. Diese Hypothese gilt es in weiterführenden Studien mit einer ausreichend großen Stichprobe zu bestätigen.

Eine maximale Verzögerung von -1.0 m/s^2 , also die schwächste untersuchte Rekuperation, wird von allen Fahrern als nicht ausreichend bewertet, obwohl sie laut der Verzögerungsbereiche nach Schumacher (2001) in nahezu allen Streckenabschnitten die entsprechend notwendigen Verzögerungen abdecken könnte. Mit der schwächsten Rekuperation muss die hydraulische Bremse häufiger benutzt werden, was als Kritikpunkt genannt wurde. Die beiden anderen Bremsvarianten werden gleichermaßen positiv bewertet, obgleich die stärkste Rekuperation von drei Fahrern als zu stark eingeschätzt wurde. Auch die situationsspezifische Bewertung deutet darauf hin, dass es den Fahrern mit den beiden stärkeren Rekuperationen schwerer fiel, die Geschwindigkeiten konstant zu halten, also gleichmäßig zu fahren.

Schlussfolgernd ist die schwächste rekuperative Bremse sowohl aus Akzeptanz- als auch Effizienzgründen nicht zu empfehlen, wenngleich in manchen Situationen mit der schwächsten Rekuperation die wenigste Energie verbraucht wurde. Eine mittelstarke rekuperative Bremse scheint eine gute Balance zwischen entnommener und rekuperierter Energie zu fördern. Dennoch wird in den folgenden Studien die stärkste rekuperative Bremse verwendet. Der Grund hierfür ist, dass zum einen die mittlere und die stärkste rekuperative Bremse abschließend vergleichbar bewertet wurden. Darüber hinaus wird mit der stärksten Rekuperation am meisten Energie rekuperiert. Dies wirkt sich signifikant auf die Energiebilanz aus, wie bereits Clarke et al. (2010) und die Ergebnisse der Studien I zeigten. Statt eine schwächere rekuperative Bremse zu verwenden, um zu starkes Beschleunigungen zu vermeiden, werden in den folgenden Studien Maßnahmen untersucht, die den Anteil entnommener Energie reduzieren könnten: ein Energiesparmodus oder ein aktives Beschleunigungspedal. Auf diese Weise wird das Potential zur weiteren Steigerung der Energiebilanz durch optimales Verzögerungsverhalten beibehalten. Inwiefern die entnommene Energie reduziert werden kann, untersuche ich in den folgenden beiden Studien.

3.4 STUDIE III: LIMITIERUNG VON LEISTUNG UND DREHMOMENT

3.4.1 Fragestellung

Die Ergebnisse der vorangegangenen Studien zeigen, dass mit Hilfe eines kombinierten Fahrbremspedals mit starker rekuperativer Bremse insbesondere das Verzögerungsverhalten optimiert und dadurch die Energieeffizienz signifikant gesteigert werden konnte und dass ein derart konfiguriertes kombiniertes Fahrbremspedal akzeptiert und bevorzugt wird. Ausschlaggebend für eine günstige Energiebilanz eines kombinierten Fahrbremspedals mit starker rekuperativer Bremse ist unter anderem, dass in diesen Bedingungen verhältnismäßig viel Energie rekuperiert wird. Gleichzeitig wird aber, verglichen mit einer konventionellen Pedallösung und schwächerer rekuperativer Bremse, mehr Energie aus der Batterie entnommen. Dies ist der Ausgangspunkt für die Evaluation weitere effizienzsteigernde Maßnahmen, da starkes Beschleunigen bei niedrigen und hohen Geschwindigkeiten, aber auch zu hohe Geschwindigkeiten signifikant mit einer ineffizienten Fahrweise zusammenhängen (Ericsson, 2001).

Das anliegende Drehmoment und die zur Verfügung stehende Leistung sind maßgeblich dafür verantwortlich, wie stark ein Fahrzeug beschleunigt. Durch die Limitierung dieser beiden Größen kann die Beschleunigung eines Fahrzeuges abgeschwächt werden. Je nachdem, welche Größe limitiert wird, kann die Beschleunigung beim Anfahren und bei geringen Geschwindigkeiten oder eher bei hohen Geschwindigkeiten abgeschwächt werden. Solche Limitierungen können beispielsweise per Knopfdruck über sogenannte Eco-Modi dem Fahrer angeboten werden. Unter Automobilherstellern finden Eco-Modi schon länger Verwendung, um den Verbrauch zu verringern. Allen gemein ist, dass durch die Aktivierung eines solchen Eco-Modus das Ansprechverhalten des Beschleunigungspedals (oder des Gasgriffes bei Motorrädern) verändert wird: Bei gleicher Pedalstellung wird weniger Drehmoment angefordert. Weiterhin kann bei ICEVs auch die Leistung limitiert werden, beispielsweise über Drosselklappen. Von Seiten der Hersteller werden aber keine genauen Angaben zur Veränderung der Pedal- bzw. Motorkennlinien gemacht. Welcher Limitierungsansatz (Drehmoment oder Leistung) zu bevorzugen ist, insbesondere im Elektrofahrzeug, ist darüber hinaus bisher nicht wissenschaftlich untersucht worden oder Veröffentlichungen zu diesem Thema fehlen. Bisher gibt es keine Studien, die beide Ansätze miteinander vergleichen und deren Wirksamkeit und Akzeptanz untersuchen.

Aus diesem Grund habe ich verschiedene Abstufungen von Limitierungen des maximalen Drehmoments als auch der maximalen Leistung in das Simulationsmodell implementiert. Das Ziel der dritten Studie war, zu überprüfen, ob die Limitierung von Drehmoment und Leistung das Beschleunigungsverhalten akzeptabel und wirksam optimieren kann und ob weitere Fahrverhaltensweisen, die für Eco-Driving relevant sind, beeinflusst werden. Hierbei überprüfe ich, welcher Limitierungsansatz zu bevorzugen ist. Außerdem evaluiere ich, wie stark eine entsprechende Limitierung sein muss, um das Beschleunigungsverhalten wirksam und akzeptabel zu optimieren.

3.4.2 Methoden

3.4.2.1 Die Limitierungen

Längsbeschleunigungen im Alltag. Das Wissen darüber, welche Längsbeschleunigungen Fahrer im Alltag erleben, diente als Ausgangspunkt für die Ausgestaltung der jeweiligen Limitierungen. Nickel und Hugemann (2003) berichten, dass im normalen Alltagsverkehr, bei Beschleunigungen nach Abbiegevorgängen oder aus dem Stillstand (bedingt durch beispielsweise rote Ampeln) die maximalen Leistungsgrenzen von Fahrzeugen nicht ausgereizt werden. Vielmehr bewegen sich die Werte zwischen $0.9/1.6/2.6 \text{ m/s}^2$ wobei die angeben Werte dem 10., 50. und 90. Perzentil der erhobenen Daten entsprechen. Im innerstädtischen Bereich und bei geringeren Geschwindigkeiten werden höhere Längsbeschleunigungen vorgefunden als bei höheren Geschwindigkeiten beispielsweise auf Landstraßen oder Autobahnen. Vor diesem Hintergrund ist die stärkste Limitierung des Drehmoments für die vorliegende Studie derart festgelegt worden, dass Anfahrtsbeschleunigungen von 1.6 m/s^2 immer noch möglich waren.

Die Versuchsbedingungen. In der vorliegenden Studie wurden die Variablen maximal verfügbares Drehmoment und maximale Leistung manipuliert. Die Auswirkungen auf das Fahrzeugverhalten sollen im Folgenden erläutert werden, da Drehmoment und Leistung sich gegenseitig beeinflussen. Abbildung 39-A zeigt das unlimitierte Fahrzeug (noLim, 1550 Nm, 50 kW), welches mit maximal $3,0 \text{ m/s}^2$ beschleunigt. Wird das maximale Drehmoment limitiert, sind nur noch geringere Anfahrtsbeschleunigungen möglich, weil dadurch das anfängliche Drehmoment herabgesetzt wird (s. Abbildung 39-B). Mit der schwächeren Limitierung (Nm -; 1000 Nm) beschleunigt das Fahrzeug mit maximal 2.1 m/s^2 . Ab einer Geschwindigkeit von etwa 40 km/h ist die Beschleunigung vergleichbar mit der des unlimitierten Fahrzeuges. Mit der stärkeren Limitierung (Nm - -; 700 Nm, vgl. Abbildung 39-C) beschleunigt das Fahrzeug mit maximal 1.6 m/s^2 und ist ab einer Geschwindigkeit von etwa 60 km/h bzgl. der Beschleunigung mit dem unlimitierten Fahrzeug vergleichbar.

Wird die Leistung limitiert (kW -, 35 kW / kW - -, 20 kW), so hat dies keinen Einfluss auf die Stärke der Anfahrtsbeschleunigung. Allerdings kann diese nur kurz gehalten werden (siehe Abbildung 39-D/E). Bei höheren Geschwindigkeiten ergibt sich aus der limitierten Leistung ein deutlich geringeres Beschleunigungsvermögen. Zu beachten ist, dass bei der Limitierung der maximalen Leistung kurzzeitig Spitzen über den limitierten Bereich möglich waren, auf Dauer die maximale Leistung aber nicht überschritten werden konnte. Die Limitierung der maximalen Dauerleistung hat in dieser Studie zudem Einfluss auf die maximale Rekuperation. Diese war umso geringer, je stärker die Limitierung der Leistung war. Weiterhin ist es aufgrund der limitierten maximalen Dauerleistung in der Bedingung kW - - kaum möglich, über 100 km/h hinaus zu beschleunigen.

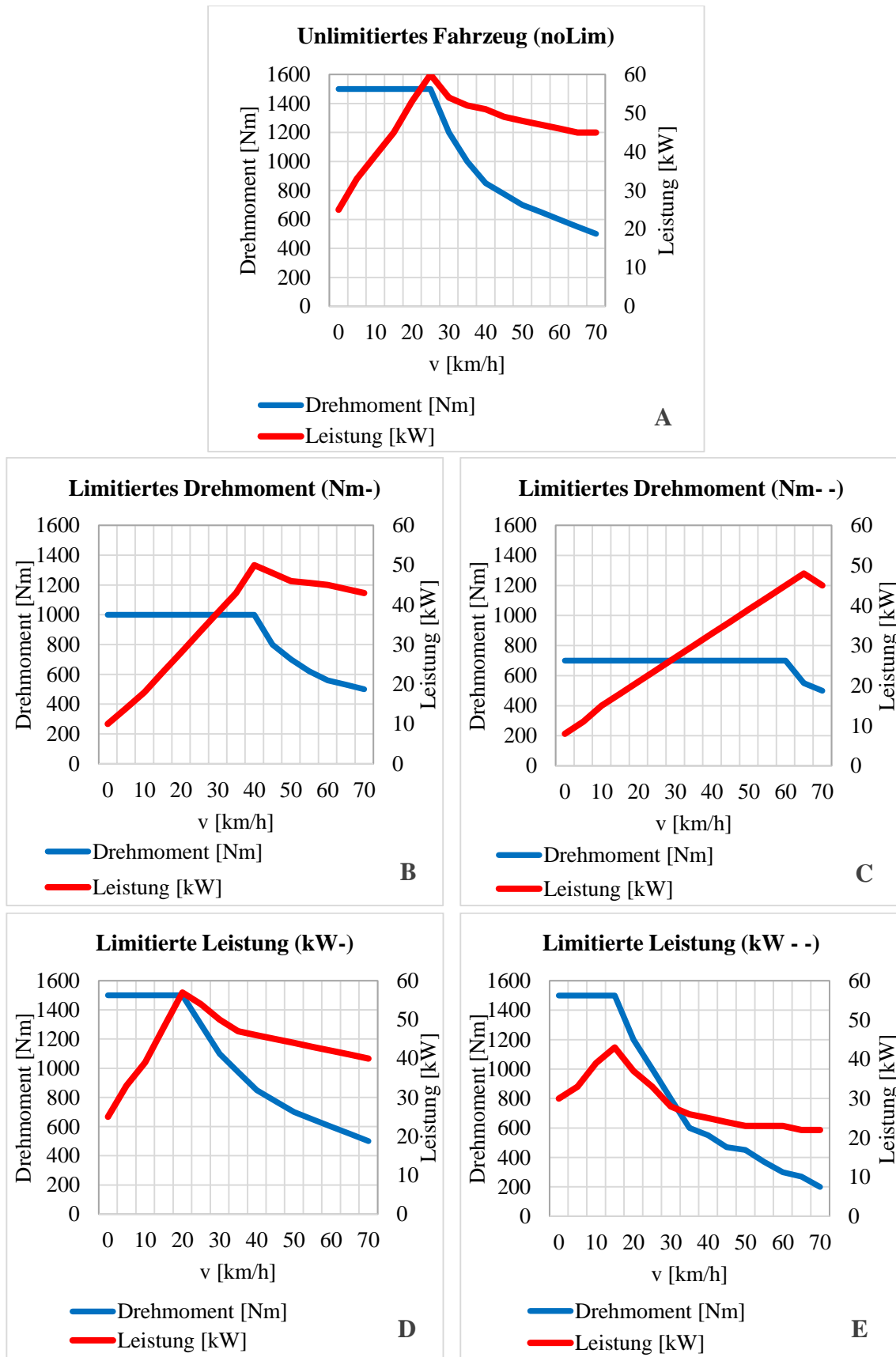


Abbildung 39: Kennkurven der fünf Fahrzeuge. Dargestellt sind Drehmoment und Leistung abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit. Die Kennkurven basieren auf Originaldaten und wurden der Anschaulichkeit wegen geglättet dargestellt.

3.4.2.2 Die Teststrecke

Die Gesamtlänge der Teststrecke umfasste 14559 Meter und eine Durchfahrt dauerte etwa 20 Minuten und war von der Charakteristik vergleichbar mit den Teststrecken der Studien I und II (für einen detaillierten Überblick über den chronologischen Ablauf der Strecke siehe Tabelle 20 im Appendix).

3.4.2.3 Versuchsanordnung

Bei der Limitierungsstudie handelt es sich um einen fünffach gestuften einfaktoriellen Messwiederholungsdesign-Versuch, bei dem die Reihenfolge aller fünf Stufen permutiert und bestmöglich ausgeglichen war. Abhängige Variablen waren die Energieeffizienz, das Fahrverhalten sowie die Akzeptanz der jeweiligen Fahrzeugkonfigurationen.

3.4.2.4 Befragung

Während jeder Testfahrt wurden die Fahrer gefragt, wie gut das Fahrzeug in der Bedingung dazu geeignet war, die folgenden Situation zu meistern: Anfahren an Kreuzungen, Steigungen, Gefälle und Überholsituationen. Die Fragen wurden anhand der 15-stufigen Kategorienunterteilungsskala nach Heller (1985) beantwortet. Am Ende jeder Testfahrt wurde zunächst gefragt, wie gut das Fahrzeug in dieser Versuchsbedingung im Allgemeinen für Beschleunigung- und Anhaltevorgänge geeignet war. Auch diese Fragen wurden anhand der Kategorienunterteilungsskala beantwortet. Darüber hinaus gaben die Fahrer in offenen Interviews an, ob und wann sie die jeweilige Limitierung gestört hatte, in welchen Situationen die Limitierungen akzeptabel waren und ob der Limitierungsansatz im Allgemeinen akzeptabel sei. Schließlich wurden die Fahrer gebeten, Verbesserungsvorschläge zu formulieren.

3.4.2.5 Ablauf

Insgesamt dauerte der Versuch etwa drei Stunden. Zunächst wurden die Fahrer über die Spezifika von Elektrofahrzeugen aufgeklärt und durften in einer 5-10-minütigen Eingewöhnungsfahrt das kombinierte Fahrbremspedal kennenlernen. Jeder Fahrer durchfuhr dann fünf Mal die gleiche Teststrecke. Die Instruktion lautete immer mit normalem Fahrstil unter Einhaltung der Verkehrsregeln zu fahren. Vor jeder Fahrt führten die Fahrer einige Probemanöver zur Eingewöhnung an das jeweilige „Fahrzeug“ auf einer einfachen zusätzlichen Teststrecke durch. Sowohl während als auch nach jeder Fahrt wurden die Fahrer zum Fahrverhalten des jeweiligen Fahrzeuges befragt.

3.4.2.6 Datenaufbereitung, statistische Auswertung und Messparameter

Die Aufbereitung der Daten, deren statistische Auswertung und die Auswahl der Messparameter entspricht dem Vorgehen der Studien I und II. Die Effekte von Drehmomentlimitierung und Leistunglimitierung werden getrennt voneinander betrachtet und mit der unlimitierten Fahrt mittels Varianzanalysen mit Messwiederholung verglichen (drei Stufen). Auch für diese Studie ist zusätzlich der den Anteil der Zeit in Prozent, in dem Energie aus der Batterie entnommen beziehungsweise beschleunigt wurde, berechnet.

3.4.3 Ergebnisse

3.4.3.1 Fahrverhalten

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Effekte der Limitierung von Drehmoment und Leistung auf die jeweiligen Fahrverhaltensparameter im Vergleich zur unlimitierten Fahrt (entsprechende Deskriptiva sind in Tabelle 24 im Appendix, Post-hoc-Tests in Tabelle 25 im Appendix dargestellt). Beide Limitierungen bewirkten, dass die Fahrzeuge im Mittel schwächer beschleunigten. Dies wiederum bewirkte, dass sich auch weitere Aspekte des Fahrverhaltens änderten: Die Probanden fuhren im Mittel langsamer und gleichmäßiger (zu sehen an der Standardabweichung der Geschwindigkeit).

Tabelle 8: Auflistung der Ergebnisse zum Fahr- und Pedalverhalten, getrennt für limitiertes Drehmoment und Leistung.

Limitierung Drehmoment	Limitierung Leistung
- Je stärker die Limitierung, desto langsamer wurde gefahren, $F(2, 46) = 8.85, p = .001, \eta_p^2 = .278$	- Je stärker die Limitierung, desto langsamer wurde gefahren, $F(2, 46) = 4.97, p = .011, \eta_p^2 = .178$
- Kein Einfluss auf die Standardabweichung der Geschwindigkeit, $F(2, 46) = 2.31, p = .111, \eta_p^2 = .091$	- Je stärker die Limitierung, desto geringer die Standardabweichung der Geschwindigkeit , $F(2, 46) = 26.67, p < .001, \eta_p^2 = .537$
- Je stärker die Limitierung, desto schwächer die mittlere positive Beschleunigung , $F(2, 46) = 66.09, p < .001, \eta_p^2 = .742$	- Je stärker die Limitierung, desto schwächer die mittlere positive Beschleunigung , $F(2, 46) = 57.76, p < .001, \eta_p^2 = .715$
- Kein Einfluss auf mittleren negativen Beschleunigungen (mit und ohne HB), $F(2, 46) < 1$	- Je stärker die Limitierung, desto geringer die mittleren negativen Beschleunigungen , generell, $F(2,46) = 3.21, p = .050, \eta_p^2 = .122$ und nur mit EB, $F(2, 46) = 12.01, p < .001, \eta_p^2 = .343$
- Kein Einfluss auf den Anteil der Zeit, in dem die hydraulische Bremse genutzt wird, $F(2, 46) < 1$	- Kein Einfluss auf den Anteil der Zeit, in dem die hydraulische Bremse genutzt wird, $F(2, 46) < 1$
- Je stärker die Limitierung, desto geringer der Anteil der Zeit, in dem die rekuperative Bremse genutzt wurde, $F(2, 46) = 10.30, p < .001, \eta_p^2 = .348$	- Je stärker die Limitierung, desto geringer der Anteil der Zeit, in dem die rekuperative Bremse genutzt wurde, $F(2, 46) = 9.01, p = .001, \eta_p^2 = .281$
- Je stärker die Limitierung, desto weniger Zeit wurde gesegelt , $F(2, 46) = 20.81, p < .001, \eta_p^2 = .475$.	- Je stärker die Limitierung, desto weniger Zeit wurde gesegelt , $F(2, 46) = 3.86, p = .028, \eta_p^2 = .144$

Tabelle 9: Richtung der Post-hoc-Tests für alle untersuchten Fahrverhaltensparameter. Für einen detaillierten Überblick über die Teststatistiken siehe Tabelle 25 im Appendix.

Parameter	Limitierung Drehmoment	Limitierung Leistung
Mittl. Geschwindigkeit	noLim = Nm- > Nm - -	Nur noLim vs. kW - - signifikant
SD Geschwindigkeit	-	noLim = kW- > kW - -
Mittl. Beschl. (ax>0)	noLim > Nm- > Nm - -	noLim > kW - > kW - -
Mittl. Verzög. (ax<0; RB + HB)	-	Nur noLim vs. kW - - signifikant
Mittl. Verzög. (ax<0; nur RB)	-	noLim > kW - > kW - -
% der Zeit RB genutzt	noLim = Nm- > Nm - -	noLim = kW- > kW - -
% der Zeit geseget	noLim > Nm- = Nm - -	noLim = kW- > kW - -

Mit limitierter Leistung wurde zudem schwächer verzögert. Beide Limitierungen bewirken darüber hinaus, dass mehr Zeit beschleunigt und weniger Zeit verzögert wurde. Dieser Effekt ist dadurch zu erklären, dass die Fahrer mehr Zeit brauchen, um die gewünschten Geschwindigkeiten zu erreichen. Aus diesem Grund wird vermutlich auch weniger lang geseget. Abbildung 40, welche das Pedalnutzungsverhalten des kombinierten Fahrbremspedals über die gesamte Fahrt mit den verschiedenen Bedingungen zeigt, veranschaulicht dieses Ergebnis: Mit zunehmender Limitierung wird eine höhere Pedalstellung gewählt, also mehr Zeit damit verbracht, Energie aus der Batterie anzufordern statt zu segeln oder zu rekuperieren. Dieses Verhalten ist sehr wahrscheinlich mit dem Wunsch nach einer stärkeren Beschleunigung zu erklären. Mit limitierter Leistung ist dieses Verhalten noch ausgeprägter als mit limitiertem Drehmoment.

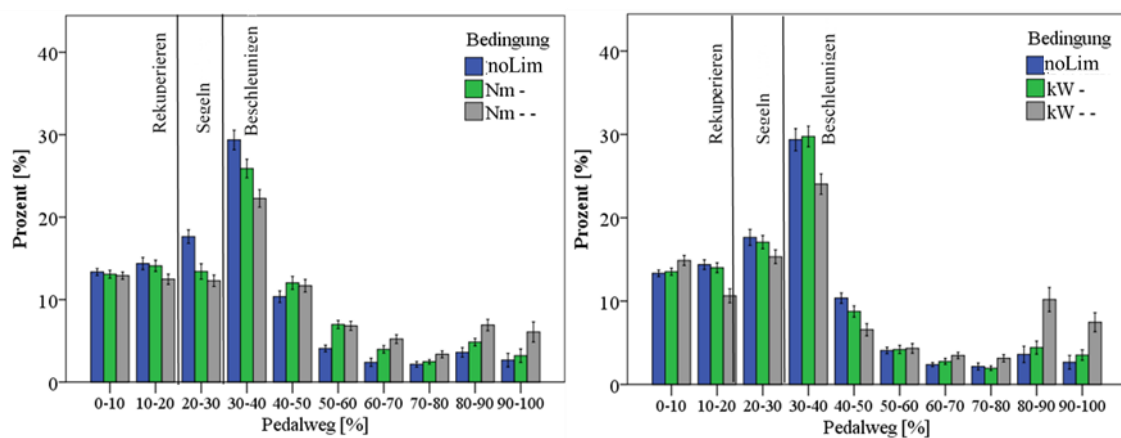


Abbildung 40: Prozent der Zeit in der eine bestimmte Pedalstellung gewählt wurde, wenn das Drehmoment (links) oder die Leistung (rechts) limitiert wurde. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

3.4.3.2 Verbrauch

Die Limitierung des maximalen Drehmoments sowie der maximalen Leistung und die damit verbundene Optimierung des Fahrverhaltens führte zu einem signifikant geringeren Verbrauch, (vgl. Abbildung 41 und Tabelle 10). Mit zunehmender Limitierung des Drehmoments und der Leistung wurde in der Summe weniger Energie verbraucht. Eine getrennte Betrachtung der entnommenen und rekuperierten Energie zeigt weiterhin, dass mit zunehmender Limitierung des maximalen Drehmoments und der maximalen Leistung weniger Energie aus der Batterie entnommen und gleichzeitig weniger Energie in die

Batterie zurückgeführt wurde (siehe Tabelle 26 und Tabelle 27 im Anhang für Deskriptiva und Teststatistiken sowie Tabelle 11).

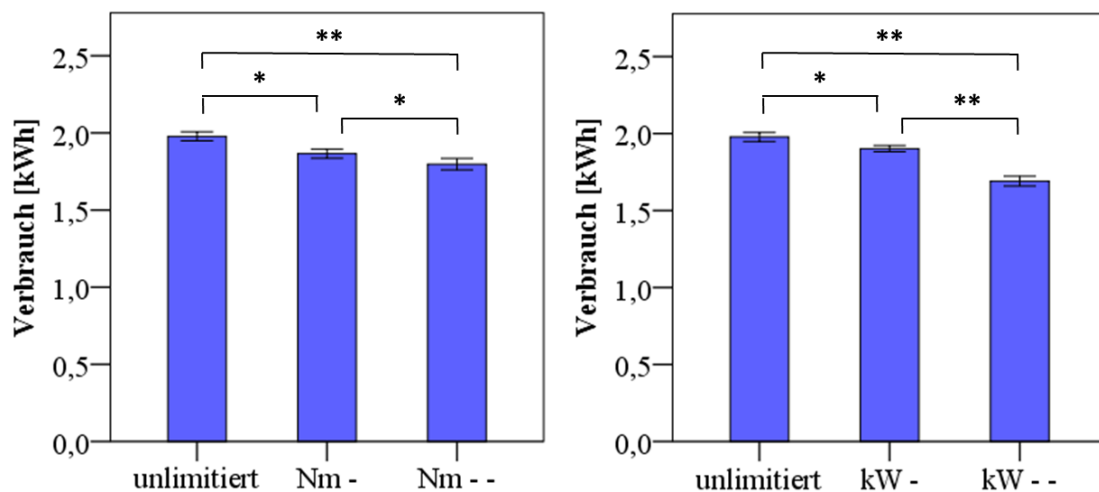


Abbildung 41: Verbrauch bei limitiertem maximalen Drehmoment (links) und limitierter Leistung (rechts) im Vergleich zur Baselinefahrt. *= $p < .05$, **= $p < .01$. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

Tabelle 10: Ergebnisse von Varianzanalysen mit Messwiederholung. AVn: Verbrauchsparameter.

	Parameter	Statistik
Limitiertes Drehmoment	Verbrauch (Summe)	$F(2, 46) = 17.54, p < .001, \eta_p^2 = .529$
	Entnommene Energie	$F(2, 46) = 14.45, p < .001, \eta_p^2 = .386$
	Rekuperierte Energie	$F(2, 46) = 3.69, p = .033, \eta_p^2 = .138$
Limitierte Leistung	Verbrauch (Summe)	$F(2, 46) = 82.85, p < .001, \eta_p^2 = .783$
	Entnommene Energie	$F(2, 46) = 85.94, p < .001, \eta_p^2 = .516$
	Rekuperierte Energie	$F(2, 46) = 49.12, p < .001, \eta_p^2 = .681$

Tabelle 11: Ergebnisse von Post-hoc-Tests für abhängige Stichproben. AV: Gesamtverbrauch. noLim = unlimitiertes Fahrzeug, „ - “ = schwach limitiert, „ - - “ = stark limitiert

	noLim vs. -	noLim vs.--	- vs. --
Limitiertes Drehmoment	$t(23) = 3.67, p = .001$	$t(23) = 5.01, p < .001$	$t(23) = 2.71, p = .012$
Limitierte Leistung	$t(23) = 4.03, p = .001$	$t(23) = 10.27, p < .001$	$t(23) = 9.80, p < .001$

Der folgende Vergleich zeigt, in welcher Bedingung am wenigsten Energie verbraucht wurde. Hierzu ist die Bonferroni-Holm Prozedur zur Vermeidung einer α -Fehler-Inflation verwendet worden (mit * gekennzeichnete p-Werte sind mit alpha-Adjustierung signifikant): Nm - vs. kW -, $t(23) = 1.46, p = .157$; Nm - vs. kW - -, $t(23) = -9.94, p < .001^*$; Nm - - vs. kW -, $t(23) = 3.80, p = .001^*$; Nm - - vs. kW - -, $t(23) = -4.86, p < .001^*$. Am wenigsten wurde mit der stärkeren Leistungslimitierung (kW - -), am zweitwenigsten mit

Nm - - verbraucht. Die beiden schwächeren Limitierungen von Drehmoment und Leistung unterscheiden sich nicht signifikant.

3.4.3.3 Situationsanalyse

Wie bereits in den vorhergehenden Studien wird analysiert, in welchen Situationen die jeweiligen Limitierungen einen Effekt auf den Verbrauch haben. Im Folgenden werden die Situationsanalysen getrennt für limitiertes Drehmoment und limitierte Leistung betrachtet.

Limitierung des maximalen Drehmoments

Eine Varianzanalyse mit den zwei Messwiederholungsfaktoren „Limitierung Drehmoment (Nm)“ und „Situation“ zeigte folgende Effekte:

- $HE_{\text{Sit}} F(64, 1408) = 657.94, p < .001, \eta_p^2 = .968$
- $HE_{\text{Nm}}: F(2, 44) = 14.70, p < .001, \eta_p^2 = .400$
- Interaktion $HE_{\text{Sit}} \times HE_{\text{Nm}}: F(128, 2816) = 4.00, p < .001, \eta_p^2 = .154.$

Aufgrund des signifikanten Interaktionseffektes ist mithilfe von weiteren Varianzanalysen mit Messwiederholung analysiert worden, in welchen Situationen sich die Limitierung des maximalen Drehmoments günstig oder ungünstig auf den Verbrauch auswirkte. Situationen, in denen mit limitiertem Drehmoment weniger Energie verbraucht wurde, sind solche, in denen aus dem Stillstand beschleunigt werden musste (vgl. Tabelle 30 im Appendix). Der Grund dafür ist, dass das Fahrzeug schwächer beschleunigte und mehr Zeit benötigte, um eine bestimmte Zielgeschwindigkeit zu erreichen. Wie aus Tabelle 30 ebenfalls zu entnehmen ist, gibt es auch Situationen, in denen mit limitiertem Drehmoment mehr Energie im Vergleich zur unlimitierten Fahrt (noLim) verbraucht wurde. Diese Situationen müssen allerdings in Relation zur vorhergehenden Situation betrachtet werden: Die Situationen, in denen die Limitierung augenscheinlich kontraproduktiv war, sind solche, in denen beispielsweise aus dem Stillstand bis 70 km/h beschleunigt wurde. Während in der unlimitierten Fahrt diese Geschwindigkeit schneller erreicht wurde und die Fahrer ab einem bestimmten Zeitpunkt begannen, die jeweilige Geschwindigkeit zu halten, beschleunigten die Fahrer in der limitierten Bedingung immer noch, um die vorgegebene Geschwindigkeit zu erreichen. Auf diese Weise kann erklärt werden, warum in manchen Situationen die Limitierung einen vermeintlich negativen Effekt auf den Verbrauch hatte. In Anbetracht der vorhergehenden Situation relativiert sich dieser Effekt jedoch. Wenn allerdings unter Zeitdruck im niedrigen Geschwindigkeitsbereich beschleunigt wurde, überkompensierten Fahrer in der Bedingung mit limitiertem Drehmoment und beschleunigten länger als mit unlimitiertem Fahrzeug.

Limitierung der Leistung

Eine Varianzanalyse mit den zwei Messwiederholungsfaktoren „Limitierung Leistung (kW)“ und „Situation“ zeigte folgende Effekte:

- $HE_{Sit} F(64, 1472) = 692.26, p < .001, \eta_p^2 = .968$
- $HE_{Nm}: F(2, 46) = 77.58, p < .001, \eta_p^2 = .771$
- Interaktion $HE_{Sit} \times HE_{Nm}: F(128, 2944) = 9.14, p < .001, \eta_p^2 = .284.$

Situationen, in denen mit limitierter Leistung weniger Energie verbraucht wurde als mit unlimitiertem Fahrzeug, sind solche, in denen bei höheren Geschwindigkeiten ($> \sim 50$ km/h) beschleunigt werden musste sowie an steilen Anstiegen (vgl. Tabelle 30 im Appendix). Grund dafür ist, dass das Fahrzeug leistungsschwächer war und entsprechend länger gebraucht hat, um eine bestimmte Zielgeschwindigkeit zu erreichen bzw. am Berg nicht die Leistung aufbringen konnte, die Geschwindigkeit zu halten. Das am stärksten limitierte Fahrzeug fuhr im Schnitt 25 km/h langsamer als das unlimitierte Fahrzeug. Am steilen Anstieg konnte das Fahrzeug mit der am stärksten limitierten Leistung (kW - -) zum Ende der Steigung kaum schneller als 50 km/h fahren.

Situationen, in denen mit limitierter Leistung mehr Energie verbraucht wurde als mit unlimitiertem Fahrzeug, sind vorwiegend solche, in denen von hohen Geschwindigkeiten kommend rekuperiert wurde. Grund dafür ist das begrenzte Rekuperationsvermögens bei limitierter Leistung. Weiterhin gab es wiederum Situationen, in denen mit limitierter Leistung im Vergleich zum unlimitierten Fahrzeug mehr Energie verbraucht wurde. Wie in den Bedingungen mit limitiertem Drehmoment, beschleunigten die Fahrer in diesen Situationen allerdings immer noch, während in der gleichen Situation mit unlimitiertem Fahrzeug bereits die Zielgeschwindigkeit erreicht worden war.

3.4.3.4 Fahrertypenanalyse

Überprüft wurde, ob es einen Interaktionseffekt von Fahrertypen mit der jeweiligen Limitierung auf den Verbrauch gab. Hierzu wurden die Fahrer mittels Mediansplit einer von zwei Gruppen (effiziente vs. ineffiziente Fahrer) zugeordnet (vgl. Abbildung 42). Als Grundlage diente die Fahrt mit unlimitiertem Fahrzeug. Alle Fahrer, die einen Verbrauch kleiner dem Mediansplit hatten, wurden der Gruppe „effizient“ zugeordnet. Alle Fahrer, die einen Verbrauch höher als der Mediansplit hatten, wurden der Gruppe „sportlich“ zugeordnet.

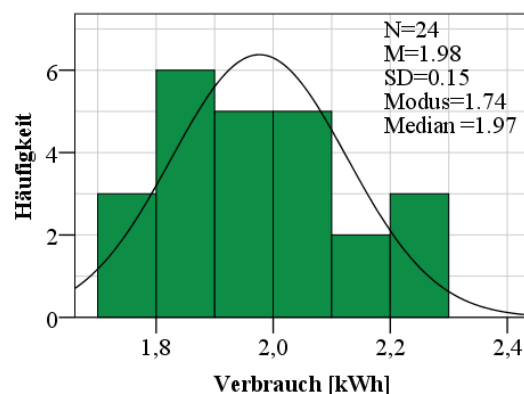


Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung des Verbrauchs in der Fahrt mit unlimitiertem Fahrzeug.

Ein Vergleich effizienter und sportlicher Fahrer zeigt, dass sportliche Fahrer im Mittel:

- mehr Energie aus der Batterie entnommen haben, $t(22) = -6.02, p < .001$
- mehr Energie rekuperierten, $t(22) = 2.80, p = .001$
- tendenziell schneller fahren, $t(22) = -2.05, p = .055$
- stärker positiv beschleunigten, $t(22) = -2.27, p = .033$
- stärker negativ beschleunigten (mit und ohne Benutzung der hydraulischen Bremse). Mit HB, $t(22) = 3.86, p = .001$; ohne HB, $t(22) = 2.96, p = .007$.

Fahrertypenanalyse für limitiertes Drehmoment.

Abbildung 43 links zeigt den mittleren Verbrauch abhängig von limitiertem Drehmoment und Fahrertyp. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit dem Innersubjektfaktor Drehmoment und dem Zwischensubjektfaktor Fahrertyp erbrachte folgende Ergebnisse:

- Haupteffekt Drehmoment: $F(2, 44) = 19.67, p < .001, \eta_p^2 = .472$
- Haupteffekt Fahrertyp: $F(1, 22) = 27.86, p < .001, \eta_p^2 = .559$
- Interaktion Drehmoment x Fahrertyp: $F(2, 44) = 3.80, p = .030, \eta_p^2 = .147$.

Post-hoc-Tests zeigen, dass sowohl effiziente Fahrer als auch ineffiziente Fahrer durch die zunehmende Limitierung des Drehmoments signifikant weniger Energie verbrauchten, wobei mit der stärksten Limitierung des Drehmoments im Vergleich zur mittleren Limitierung die Energieeinsparung für beide Gruppen nur marginal signifikant wird. Weiterhin verbrauchen beide Fahrergruppen in der Bedingung Nm - - vergleichbar viel Energie, anders als in der Baselinefahrt und mit Nm - . Für einen detaillierten Überblick über die Teststatistiken siehe Tabelle 28 und Tabelle 29 im Appendix.

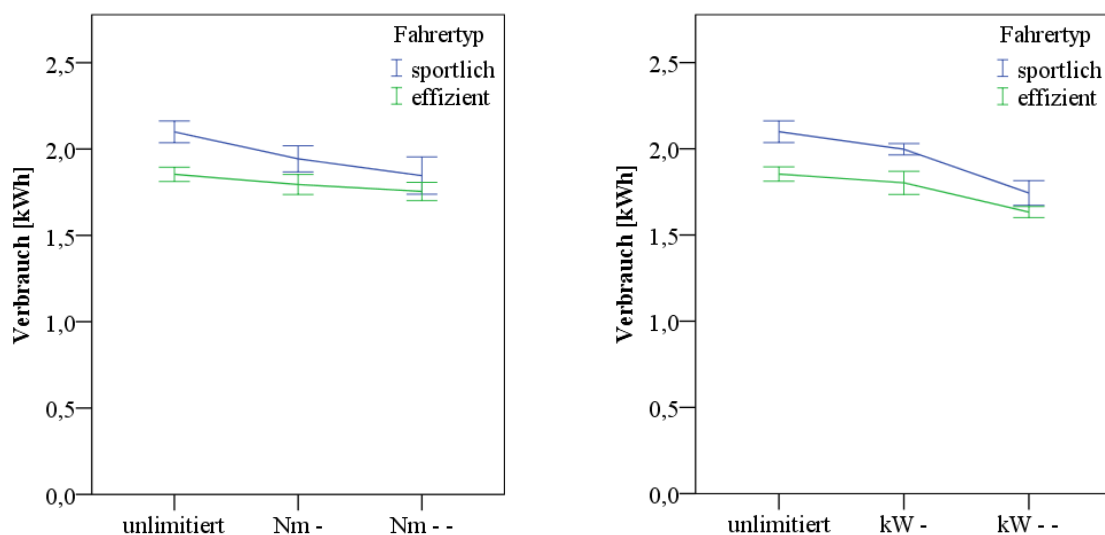


Abbildung 43: Verbrauch des Fahrertyps und limitiertem Drehmoment (links) und limitierter Leistung (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

Fahrertypenanalyse für limitierte Leistung

Abbildung 43 rechts zeigt den mittleren Verbrauch abhängig von maximaler Leistung und Fahrertyp. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit dem Innersubjektfaktor Leistung und dem Zwischensubjektfaktor Fahrertyp erbrachte folgende Ergebnisse:

- Haupteffekt Leistung: $F(2, 44) = 97.59, p < .001, \eta_p^2 = .816$
- Haupteffekt Fahrertyp: $F(1, 22) = 56.81, p < .001, \eta_p^2 = .721$
- Interaktion Leistung x Fahrertyp: $F(2, 44) = 5.09, p = .010, \eta_p^2 = .188$.

Post-hoc-Tests zeigen, dass sowohl effiziente Fahrer als auch sportliche Fahrer mit zunehmender Limitierung signifikant weniger Energie verbrauchten und dass effiziente Fahrer in jeder der drei Bedingungen weniger Energie verbraucht haben als sportliche Fahrer. Effiziente Fahrer verbrauchen allerdings mit mittlerer Limitierung (kW -) nur marginal weniger Energie verglichen mit der unlimitierten Fahrt. Die signifikante Interaktion zeigt, dass effiziente Fahrer im Gegensatz zu ineffizienten Fahrern eher durch eine stärkere Limitierung der Leistung den Energieverbrauch im Vergleich zur unlimitierten Fahrt verbessern können. Für einen detaillierten Überblick über die Teststatistiken siehe Tabelle 28 und Tabelle 29 im Appendix.

Auch wenn sowohl effiziente als auch ineffiziente Fahrer durch die Limitierung der Leistung Energie einsparen können, gibt es große interindividuelle Unterschiede. Der effizienteste Fahrer in der Bedingung kW - - hat zum Beispiel einen Verbrauch, der 23 % geringer ist als der ineffizienteste Fahrer in der Bedingung kW - -. Selbst mit der stärksten Limitierung bleibt also immer noch Potential das Fahrverhalten weiter zu optimieren.

3.4.3.5 Befragungsdaten

Abbildung 44 zeigt die Urteile der Fahrer zur Benutzerfreundlichkeit der Fahrzeuge in den jeweiligen Versuchsbedingungen (siehe Tabelle 12 für die zugehörigen Statistiken). Die Fahrer waren hierbei durchaus in der Lage, die unterschiedlichen Charakteristika der jeweiligen Fahrzeuge differenziert zu bewerten. Sowohl hinsichtlich des allgemeinen Beschleunigungsvermögens als auch beim „Anfahren an Kreuzungen“ wurden die limitierten Fahrzeuge im Vergleich zum unlimitierten Fahrzeug signifikant negativer bewertet. „Anhalten“ und „Befahren von Steigungen“ wurde zudem mit maximal limitierter Leistung abgewertet. Dies ist einerseits durch die geringere Rekuperationsstärke und andererseits mit den verminderten Geschwindigkeiten zu erklären. Die Bewertung für die Situation „Bergabfahren“ war in allen Bedingungen vergleichbar.

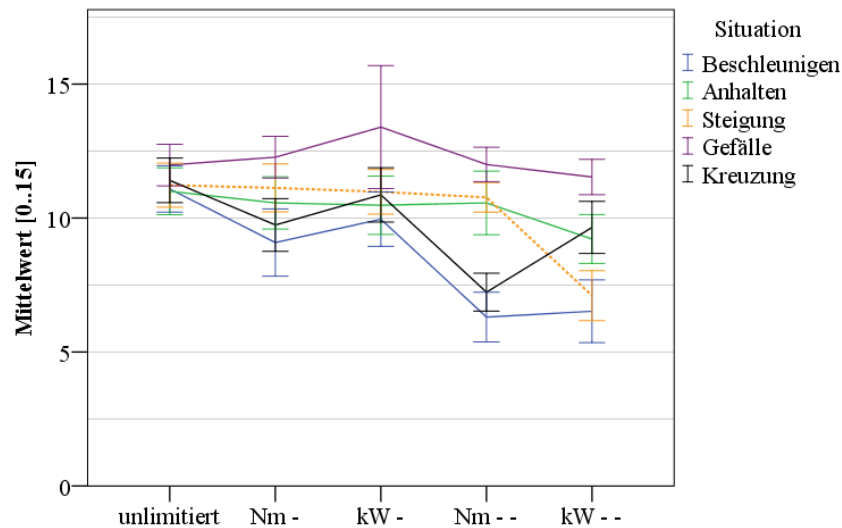


Abbildung 44: Urteile der Fahrer zur Benutzerfreundlichkeit in verschiedenen Situationen. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

Tabelle 12: Ergebnisse von Varianzanalysen mit Messwiederholung und t-Tests für abhängige Stichproben. AVn: Benutzerfreundlichkeit.

Situation	UV	Varianzanalyse	Post-hoc		
			noLim vs. -	noLim vs. --	- vs. --
Beschleunigen	Nm	F(2, 46) = 24.07, p < .001	t(23) = 2.60, p = .016	t(23) = 7.62, p < .001	t(23) = 4.14, p < .001
	kW	F(2, 46) = 20.22, p < .001	t(23) = 1.72, p = .099	t(23) = 5.17, p < .001	t(23) = 5.05, p < .001
Anhalten	Nm	F(2, 46) < 1			
	kW	F(2, 46) = 5.02, p = .011	t(23) = 1.05, p = .306	t(23) = 2.80, p = .010	t(23) = 2.13, p = .044
Steigung	Nm	F(2, 46) < 1			
	kW	F(2, 46) = 42.23, p < .001	t(23) < 1	t(23) = 6.69, p < .001	t(23) = 8.23, p < .001
Gefälle	Nm	F(2, 46) < 1			
	kW	F(2, 46) = 2.32, p = .110			
Kreuzungen	Nm	F(2, 46) = 40.00, p < .001	t(23) = 3.28, p = .003	t(23) = 9.84, p < .001	t(23) = 5.29, p < .001
	kW	F(2, 46) = 5.40, p = .008	t(23) = 1.18, p = .250	t(23) = 3.12, p = .005	t(23) = 1.99, p = .058

Aus den Interviews nach jeder Fahrt geht hervor, dass der Limitierungsansatz von der Hälfte aller Probanden abgelehnt wird oder zumindest nur dann akzeptabel sei, wenn der Limitierungsansatz verbessert werden würde (s. u.). Für viele Fahrer stellt die Limitierung von Anfahrtsbeschleunigungen oder Höchstgeschwindigkeiten ein verkehrssicherheitsrelevantes Problem dar. Die Fahrer äußerten sich besorgt, Grund für Überholmanöver anderer Fahrer zu sein. Die schwächeren Limitierungen wurden eher akzeptiert als die starken Limitierungen. Einigkeit bestand dahingehend, dass Probanden eine schnelle Möglichkeit wünschten die Limitierung zu überstimmen, beispielsweise mit Hilfe eines Kick-Downs. Einige Fahrer sagten, eine „gesunde“ Mischung aus den beiden schwächeren Limitierungen mit schneller Möglichkeit diese zu deaktivieren, wäre akzeptabel.

Auf die Frage hin, in welchen Situationen sich die Fahrer mehr Leistung gewünscht hätten, antworteten die meisten „beim Anfahren“ und „beim Bergauffahren“, also genau in den Situationen, in denen die jeweilige Limitierung greift. Akzeptabel sei eine Limitierung laut Fahrer auf Streckenabschnitten, auf denen nicht beschleunigt werden müsse oder beim

Bergabfahren, also genau in solchen Situationen, in denen die Limitierung aus energetischer Sicht keinen Sinn machen würde und auch nicht spürbar war.

3.4.4 Diskussion

Ziel der dritten Studie war, zu überprüfen, welche Limitierung (maximales Drehmoment vs. maximale Leistung) das Beschleunigungsverhalten wirksam aber vor allem akzeptabel optimieren kann und welcher Limitierungsansatz zu bevorzugen ist. Hierzu durchfuhren alle Fahrer in einem abhängigen Design dieselbe Teststrecke mit fünf Fahrzeugvarianten, wobei eine Fahrzeugvariante ein unlimitiertes Fahrzeug darstellte und die anderen vier in ihrem Drehmoment (zwei Stufen) oder ihrer Leistung (zwei Stufen) limitiert waren.

Beide Limitierungsansätze haben das Beschleunigungsverhalten im Vergleich zum unlimitierten Fahrzeug signifikant optimiert, sodass die limitierten Fahrzeuge im Mittel schwächer beschleunigten. Dies hatte zudem weitere Auswirkungen: Es wurde langsamer gefahren, länger beschleunigt und weniger gesegelt. Die Analyse des Pedalverhaltens zeigt, dass mit zunehmender Limitierung des Drehmoments und der Leistung das Beschleunigungspedal länger maximal durchgedrückt wurde. Dieser Umstand zeigt, dass das durch die Limitierungen erzeugte Fahrzeugverhalten im Gegensatz zu dem gewünschten Fahrverhalten stand. Dies deckt sich auch mit den subjektiven Daten. Die Fahrer versuchten trotz der Limitierungen die vorgegebenen Geschwindigkeiten schneller zu erreichen. Die Limitierungen verhinderten dies allerdings. Zum Teil konnten die gewünschten Geschwindigkeiten gar nicht erreicht werden, weil bereits auf eine anschließende Geschwindigkeitsbegrenzung reagiert werden musste.

Das optimierte Fahrzeug- und Fahrverhalten führte in allen Versuchsbedingungen dazu, dass der Verbrauch signifikant reduziert werden konnte. Besonders wirksam haben die beiden stärksten Limitierungen, insbesondere die der Leistung, den Energieverbrauch senken können. Anders als in den beiden vorherigen Studien wurde die Menge der entnommenen Energie reduziert, obwohl die Fahrer aufgrund der Limitierungen deutlich länger beschleunigten als in der Bedingung mit unlimitiertem Fahrzeug. Gleichzeitig hatten die Limitierungen jedoch zur Folge, dass eine geringere Menge an Energie rekuperiert wurde. Bezugnehmend auf die Ergebnisse der zweiten Studie, die zeigen, dass eine starke Rekuperation die Energiebilanz deutlich verbessern kann, sollte eine Limitierung des Drehmoments oder der Leistung die Rekuperation nicht abschwächen. Auf diese Weise könnte das Energieeinsparpotential durch Eco-Driving weiter ausgeschöpft werden.

Die Limitierung des maximalen Drehmoments führte zu reduzierten Anfahrtsbeschleunigungen, die Limitierung der maximalen Leistung führte zu reduziertem Beschleunigungsvermögen bei höheren Geschwindigkeiten und zu einer maximalen Geschwindigkeit von ca. 100 km/h, an Steigungen sogar weniger. Entsprechend verbesserten die beiden Limitierungsansätze die Energieeffizienz in voneinander abgegrenzten Situationen. Aufgrund dieser Ergebnisse wird eine Kombination beider Limitierungsansätze empfohlen, um den Verbrauch sowohl in höheren als auch niedrigeren Geschwindigkeitsbereichen zu optimieren. Es wird erwartet, dass der Verbrauch auf diese Weise stärker reduziert wird als mit nur einem Limitierungsansatz. Allerdings waren die Limitierungen zu stark und wurden daher als einschränkend und sicherheitskritisch

bewertet (s.u.). Trotz Limitierung sollte das Fahrzeug immer noch stark genug sein, um Steigungen und Kreuzungen auch subjektiv sicher passieren zu können. Daher werden mittelstarke Limitierungen und die Integration eines Kick-Downs empfohlen, um den wichtigsten Kritikpunkten der Fahrer zu begegnen und die Akzeptanz zu steigern.

Effiziente sowie ineffiziente Fahrer optimierten ihren Verbrauch mit Hilfe beider Limitierungsansätze nahezu in vergleichbarer Weise, wobei ineffiziente Fahrer in fast allen Versuchsbedingungen mehr Energie verbrauchten als effiziente Fahrer. Dennoch gibt es innerhalb der wirksamsten Versuchsbedingung eine große Streuung der Verbräuche, welche die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen zur Förderung von Eco-Driving verdeutlicht.

Die Versuchsbedingungen bzw. Fahrzeuge, die das Fahrverhalten am wirksamsten optimierten, waren gleichzeitig diejenigen, die am stärksten abgelehnt wurden. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Studie I und II. Hier wurden die effizientesten Varianten akzeptiert und mehrheitlich favorisiert. Mit am stärksten limitierter Leistung waren der Verbrauch und die Akzeptanz am geringsten. Letzteres ist vor allem damit zu erklären, dass an Steigungen nur ca. 50 km/h bei erlaubten 100 km/h erreicht werden konnten. Sicherheitsbedenken, wie die Angst, nicht schnell genug eine stark befahrene Straße kreuzen zu können oder an Steigungen nicht nur ein Hindernis darzustellen, sondern auch der Grund für Überholmanöver zu sein, wurden daher geäußert. Ein Kick-Down, der eine schnelle Deaktivierung der Limitierungen bewirkt, ist daher eine vielversprechende Möglichkeit diesen Bedenken und Kritikpunkten zu begegnen. Das Pedalnutzungsverhalten zeigt allerdings, dass mit steigender Limitierung das Beschleunigungspedal länger maximal durchgedrückt wurde. Da die Probanden angaben, dass sie sich vor allem am Berg oder an Kreuzungen mehr Leistung gewünscht haben, ist anzunehmen, dass sie genau in den Situationen den Kick-Down betätigen würden, in denen die entsprechenden Limitierungen wirksam sind. Ein aktives Beschleunigungspedal könnte in solchen Situationen daher effektiver sein. Dieses könnte Widerstände aufbauen, wenn der Fahrer beispielsweise zu viel Leistung abruft; die Möglichkeit dennoch mehr Leistung (oder Drehmoment) anzufordern ist allzeit gegeben. Der Vergleich einer optimierten Limitierung und eines aktiven Beschleunigungspedals stellt einen interessanten Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen dar.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sowohl die Limitierungen des Drehmoments als auch der Leistung das Beschleunigungsverhalten optimiert haben. Die Limitierung des Drehmoments war vor allem in niedrigen, die Limitierung der Leistung vor allem in hohen Geschwindigkeitsbereichen wirksam. Aus diesem Grund wird eine Kombination aus beiden Limitierungsansätzen empfohlen, um die Energieeffizienz zusätzlich zu steigern. Weiterhin werden mittelstarke Limitierungen in Kombination mit einem Kickdown zur Steigerung der Akzeptanz empfohlen. In folgenden Untersuchungen müsste allerdings mit diesem verbesserten Limitierungsansatz gezeigt werden, dass ein Kick-Down die effizienzsteigernden Effekte der Limitierung nicht aufhebt. Dass in der Bedingung mit der stärksten Limitierung der effizienteste Fahrer immer noch etwa 23 % weniger Energie verbrauchte als der ineffizienteste Fahrer in der gleichen Bedingung, zeigt darüber hinaus, dass weitere Ansatzpunkte zur Optimierung des Fahrverhaltens evaluiert werden müssen.

3.5 STUDIE IV: DAS AKTIVE BESCHLEUNIGUNGSPEDAL

Die Ergebnisse der dritten Studie zeigen, dass die Limitierung von Leistung und Drehmoment das Beschleunigungsverhalten effektiv optimieren konnte und die mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten reduziert wurden. Darüber hinaus können Verbesserungsvorschläge zur Steigerung der Akzeptanz abgeleitet werden (Kombination beider Limitierungen, Verwendung mittelstarker Limitierungen, Einbindung eines Kick-Downs). Diese Veränderungen, insbesondere die Einbindung eines Kick-Downs und die Wahl mittelstarker Limitierung, könnten aber dazu führen, dass die Energieeffizienz nicht zufriedenstellend gesteigert werden kann. Eines der Ziele der vierten Studie ist daher die Effektivität und Akzeptanz des optimierten Limitierungsansatzes zu überprüfen. Ein weiteres Ziel ist es, den Limitierungsansatz mit einem aktiven Beschleunigungspedal zu vergleichen, da dessen Verwendung ebenfalls ein vielversprechender Ansatz zur Förderung eines energieeffizienten Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverhalten ist, ohne jedoch Drehmoment oder Leistung zu limitieren. Dies wird im nachfolgenden Forschungsstand zum aktiven Beschleunigungspedal dargestellt.

3.5.1 Aktueller Forschungsstand zum aktiven Beschleunigungspedal

Die Forschungsarbeiten, in denen ein aktives Beschleunigungspedal evaluiert wird, konzentrieren sich bisher auf dessen Einsatz im Bereich der Sicherheits- und Effizienzsteigerung. Da sich diese beiden Ziele bezüglich einiger Fahrverhaltensparameter überschneiden, werden im Folgenden auch relevante Studien aus dem Kontext Fahrsicherheit dargestellt.

Fahrsicherheit. In einer großangelegten Langzeit-Realfahrstudie von Várhelyi et al. (2002) mit 281 Probanden konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe eines aktiven Beschleunigungspedals die mittleren Geschwindigkeiten bzw. Geschwindigkeitsüberschreitungen signifikant reduziert und die Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen vergrößert wurden. Allerdings vergaßen Fahrer, ihre Geschwindigkeit anzupassen, wenn sie ohne Unterstützung fuhren (Hjälmdahl & Várhelyi, 2004). Dass ein aktives Beschleunigungspedal helfen kann, die Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen zu vergrößern oder notwendige Bremsungen bei zu geringen Abständen einzuleiten, konnte auch in weiteren Studien bestätigt werden (de Rosario et al., 2010; Lange et al., 2008; Mulder, 2007; Seto et al., 2008).

Effizienzsteigerung. Ein aktives Beschleunigungspedal zur Steigerung der Energieeffizienz wird unter anderem von Nissan oder Bosch angeboten. Das Nissan ECO Pedal wird mit einer 5-10 % Energieeinsparung beworben (Nissan Global, 2008), das aktive Beschleunigungspedal von Bosch mit einer Energie- bzw. Kraftstoffeinsparung von bis zu 7 % (Robert Bosch GmbH, 2016). Darüber hinaus sind folgende empirische Studien durchgeführt worden.

In einer Simulatorstudie von Azzi, Reymond, Mérienne und Kemeny (2011) konnte die Effektivität eines aktiven Beschleunigungspedals zur Vermeidung zu starker Beschleunigungen bestätigt werden. Das aktive Beschleunigungspedal schaltete einen Widerstand immer dann auf, wenn die aktuelle Beschleunigung die optimale Beschleunigung (basierend auf einem Algorithmus, der die aktuelle Geschwindigkeit

miteinbezieht) überschreitet. Sowohl die Kontrollgruppe als auch die Experimentalgruppe waren instruiert effizient zu fahren. Es zeigte sich, dass das aktive Beschleunigungspedal die Emissionswerte im Vergleich zu der Kontrollgruppe, die ohne Unterstützung fuhr, signifikant verringern konnte. Birrell, Young und Weldon (2013) evaluierten ein aktives Beschleunigungspedal ebenfalls im Simulator. Sie verglichen eine Baselinefahrt, eine Fahrt, in der die Fahrer gebeten wurden, nach eigenem Ermessen effizient zu fahren und eine weitere Fahrt, in der die Fahrer ebenfalls instruiert und zusätzlich von einem aktiven Beschleunigungspedal unterstützt wurden (abhängiges Design). Das aktive Beschleunigungspedal vibrierte in dieser Studie, sobald der Fahrer das Pedal um mehr als 50 % durchdrückte. Die Ergebnisse zeigen, dass das haptische Feedback mittlere Beschleunigungen im Vergleich zur Baselinefahrt, nicht aber im Vergleich zur Fahrt mit Instruktion, signifikant verringern konnte. In einer weiteren Simulatorstudie, in der ein aktives Beschleunigungspedal evaluiert wurde, konnte eine Kraftstoffersparnis von 10.9 % nachgewiesen werden (Lange et al., 2008). In der in Schweden durchgeführten Langzeit-Realfahrtstudie, in welcher das aktive Beschleunigungspedal zur Minderung von Geschwindigkeitsüberschreitung eingesetzt wurde, ist eine Senkung des Verbrauches und der Emissionswerte um lediglich 1 % nachgewiesen worden (Várhelyi et al., 2002).

Akzeptanz. In einer Befragungsstudie untersuchten Meschtscherjakov, Wilfinger, Scherndl und Tscheligi (2009) die Akzeptanz eines aktiven Beschleunigungspedals und anderer Eco-Assistenten (beispielsweise eine Anzeige im Kombiinstrument). Die Absicht, ein aktives Beschleunigungspedal zu nutzen, war gering, die empfundene Gebrauchstauglichkeit eines solchen Systems wurden nur als mittelmäßig bewertet und im Vergleich zu allen anderen Systemen wurde das aktive Beschleunigungspedal auf diesen Skalen am schlechtesten bewertet. Einzig die Handhabung des aktiven Beschleunigungspedals wurde als einfach eingeschätzt. Obwohl die Probanden angaben, dass sie das aktive Beschleunigungspedal für nützlich erachteten, die Energieeffizienz zu steigern, glaubten sie, dass es sie stören würde und einen negativen Einfluss auf die Fahrsicherheit haben könnte. Dies bestätigte sich auch in einer Realfahrtstudie, in der das aktive Beschleunigungspedal mit einer akustischen Variante des Systems (zur Vermeidung von Geschwindigkeitsüberschreitungen) verglichen wurde. Die Fahrer bevorzugten das akustische System, obwohl sie mit dem aktiven Beschleunigungspedal bezüglich des wahrgenommenen Nutzens zufriedener waren (Adell, Várhelyi, & Hjälm Dahl, 2008). Als Grund gaben die Fahrer an, sich durch das aktive Beschleunigungspedal bevormundet und kontrolliert gefühlt zu haben. In der Simulatorstudie von Lange et al. (2008) hatte das aktive Beschleunigungspedal allerdings positive Auswirkungen auf das empfundene Sicherheitsgefühl. Lernten Fahrer in einer Realfahrtstudie keine Alternativen zum aktiven Beschleunigungspedal kennen, so wurde dieses aber generell positiv bewertet, auch wenn die Bereitschaft, ein solches System zu kaufen, gering war (Adell & Várhelyi, 2008).

Kognitive Beanspruchung. Wenn Fahrer durch ein aktives Beschleunigungspedal unterstützt wurden, konnte die wahrgenommene Beanspruchung bei Folgefahrten (Lange et al., 2008; Seto et al., 2008), bei der Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzungen (Lange et al., 2008) und bei der Vermeidung von starken Beschleunigungen (Birrell et al., 2013) vermindert werden. Bei der Studie von Birrell et al. (2013) ist allerdings zu beachten, dass die Fahrten jeweils nur fünf Minuten dauerten. In der Realfahrtstudie von Adell und

Várhelyi (2008) nahmen die Probanden hingegen einen erhöhten Zeitdruck, erhöhte Anstrengung und erhöhte Frustration und somit eine gesteigerte kognitive Beanspruchung während der Fahrten mit einem aktiven Beschleunigungspedal wahr. Allerdings urteilten die Fahrer auch, dass sich ihre Fahrleistung durch die Unterstützung eines aktiven Beschleunigungspedals verbessert hätte und sie sich nicht von der Fahraufgabe abgelenkt fühlten (Adell & Várhelyi, 2008). Für die Beanspruchung sind die Ergebnisse also insgesamt widersprüchlich, insbesondere weil die Studie von Seto et al. (2008), in der das aktive Beschleunigungspedal positive Auswirkungen auf die Beanspruchung hatte, ebenfalls eine Realfahrstudie war.

Parametrisierung. Die oben genannten Studien bestätigen die positive Auswirkungen eines aktiven Beschleunigungspedals auf die Fahrsicherheit und Energieeffizienz, verwenden allerdings unterschiedliche zugrunde liegenden Algorithmen und Funktionsweisen des Pedals (z.B. Vibration vs. Gegendruck). In einer Studie von Adell, Varhelyi, Alonso und Plaza (2008) bevorzugten 17 von 26 Probanden eine schwächere aktive Beschleunigungspedal-Variante gegenüber einer stärkeren für die Abstands- und Geschwindigkeitswarnung. Weiterhin wurde eine pulsierende Abstands- und Geschwindigkeitswarnung einer statischen vorgezogen. Jamson, Hibberd und Merat (2013) berichten hingegen, dass zur Effizienzsteigerung ein sprunghafter, dann aber konstanter Widerstand gegenüber der widerstandsteigernden Alternative präferiert wird. Weiterhin bevorzugten die Fahrer der Studie einen starken gegenüber einem schwachen Widerstand (40 N vs. 20 N). Da in dieser Studie allerdings neben einem subjektiven Maß nur ein Verhaltensparameter als Hinweis für die Steigerung der Energieeffizienz herangezogen wurde und darüber hinaus die Testszenarien nie länger als 30 Sekunden dauerten und einseitig waren, sind die Ergebnisse von Jamson et al. (2013) mit Vorsicht zu interpretieren. Dennoch sind die bisherigen Ergebnisse bzgl. einer gleichzeitig effektiven und akzeptablen Parametrisierung eines aktiven Beschleunigungspedals zur Förderung von Eco-Driving widersprüchlich. Aus diesem Grund ist die Parametrisierung des aktiven Beschleunigungspedals in der vierten Studie durch Vortests festgelegt worden.

3.5.2 Fragestellung

Der Ausgangspunkt für Studie IV war der Optimierungsbedarf des Limitierungsansatzes sowie der interessante Vergleich des Limitierungsansatzes mit einem aktiven Beschleunigungspedal. Wie der Forschungsstand zur Verwendung eines aktiven Beschleunigungspedals zeigt, kann dieses ein wirksamer Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz durch die Förderung von effizientem Beschleunigen und der Vermeidung von Geschwindigkeitsüberschreitungen sein, wohingegen die Ergebnisse zur Akzeptanz, kognitiven Beanspruchung und optimalen Parametrisierung zum Teil widersprüchlich sind. Die berichteten Studien sind in mancher Hinsicht aus methodischen Gesichtspunkten nur bedingt zufriedenstellend, etwa die Anzahl der untersuchten Fahrverhaltensparameter oder die Art und Länge der Teststrecke betreffend. Darüber hinaus wurde in keiner der bisher durchgeführten Studien ein aktives Beschleunigungspedal im Elektrofahrzeug untersucht. Daraus resultieren folgende Fragestellungen:

Erstens untersuche ich, ob trotz der geringeren Limitierungsstärken und der Einbindung eines Kick-Downs Eco-Driving weiterhin wirksam gefördert und die Akzeptanz im

Vergleich zur dritten Studie gesteigert werden kann. Es gilt u.a. zu prüfen, ob der Kick-Down in eben jenen Situationen eingesetzt wird (und somit die Limitierung außer Kraft gesetzt wird), in denen die Limitierung den größten Effizienzgewinn bewirken könnte. Es wird erwartet, dass dies einerseits zu einer Akzeptanzsteigerung führen würde, weil Fahrer in den entsprechenden Situationen mit der limitierten Leistung unzufrieden waren, andererseits aber den Effekt auf den Verbrauch senken würde. Inwiefern es also zu einem Trade-off von Effizienz und Akzeptanz kommt, ist Teil der Fragestellung der vierten Studie.

Weiterhin stelle ich den optimierten Limitierungsansatz dem aktiven Beschleunigungspedal gegenüberzustellen und überprüfe die Vor- und Nachteile beider Ansätze, um zu bewerten, welcher Ansatz zu bevorzugen ist. Der Vergleich ist deshalb interessant, da beide Ansätze das Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverhalten beeinflussen können, das aktive Beschleunigungspedal allerdings ohne Limitierungen auskommt, was einen Akzeptanzvorteil gegenüber dem Limitierungsansatz darstellen könnte. Hierbei gibt es Hinweise, dass, selbst wenn durch die Verwendung eines aktiven Beschleunigungspedals keine visuellen Ressourcen beansprucht werden, die kognitive Beanspruchung steigen kann. Bei der Beantwortung der Frage, welcher der beiden Ansätze zu bevorzugen ist, werde ich daher die Effektivität, die Akzeptanz und die kognitive Beanspruchung berücksichtigen. Darüber hinaus implementiere ich zwei verschiedene Varianten des aktiven Beschleunigungspedals mit unterschiedlichen zugrundeliegenden Algorithmen, und vergleiche diese. Dies soll einen Beitrag zur optimalen Parametrisierung eines aktiven Beschleunigungspedals leisten, da die Befunde diesbezüglich widersprüchlich sind. Und schließlich überprüfe ich, inwiefern ein aktives Beschleunigungspedal eine optimale Rekuperation fördern kann.

3.5.3 Methoden

3.5.3.1 Die Versuchsbedingungen

Für die vorliegende Studie wurde das „Accelerator Force Feedback Pedal“ der Firma „Continental“ in den Fahrsimulator implementiert. Die beiden Varianten des aktiven Beschleunigungspedals wurden in Vortests erarbeitet.

Baseline. Das unlimitierte Fahrzeug, das für die Baselinefahrt verwendet wurde, entspricht in seiner Parametrisierung (kW und Nm) dem in Studie III verwendeten unlimitierten Fahrzeug mit kombiniertem Fahrbremspedal und es waren keine Widerstände aktiv. Im Folgenden wird diese Fahrt mit BAS abgekürzt.

Verbesserter Limitierungsansatz. Der Limitierungsansatz in Studie IV, ist aufbauend auf den Erkenntnissen der Studie III verbessert worden. Die Limitierung entsprach einer Kombination aus Nm- und kW- und somit einer mittelstarke Limitierung des Drehmoments (maximale positive Beschleunigung 2.1 m/s^2) und einer mittelstarken Limitierung der Leistung (problemloses Erreichen von 100 km/h möglich). Anders als in Studie III war es möglich, trotz limitierter Leistung, unbegrenzt Energie zu rekuperieren. Die Verzögerung bei vollständigem Verlassen des Beschleunigungspedals entsprach der des unlimitierten Baseline-Fahrzeuges. Zudem ist ein Kick-Down integriert worden. Bei Übertretung des Beschleunigungspedalwegs von mehr als 90 % wurde die volle Leistung des Fahrzeuges

bereitgestellt. Das Fahrzeug entsprach also, wenn der Kick-Down gedrückt war, dem unlimitierten Baseline-Fahrzeug. Damit der Fahrer nicht ungewollt in den Kick-Down-Bereich kam, lag ein Widerstand auf dem Beschleunigungspedal, sodass, um die letzten 10 % Pedalweg zu drücken, 25 Newton aufgewendet werden müssen. Der Widerstand ermöglichte dem Fahrer weiterhin, sich bei 90 % des Pedalweges anzulehnen und auf diese Weise die maximale limitierte Leistung abzurufen. Darüber hinaus waren in dieser Bedingung keine Widerstände auf dem Beschleunigungspedal aktiv. Im Folgenden wird diese Bedingung mit LIM abgekürzt.

Das aktive Beschleunigungspedal Variante A. Die Ergebnisse von Studie III zeigen, dass die Limitierung von Drehmoment und Leistung das Beschleunigungsverhalten wirksam beeinflussen konnte. Mit der ersten Variante des aktiven Beschleunigungspedals sollte daher ein vergleichbares Verhalten wie mit dem Limitierungsansatz gefördert werden, jedoch ohne das Fahrzeug zu limitieren. Das aktive Beschleunigungspedal kann in dieser Bedingung als Pendant zum Limitierungsansatz verstanden werden: Es aktivierte Widerstände ab einem Drehmoment, welches mit dem Limitierungsansatz nicht mehr verfügbar war. Sobald der Fahrer mehr als 1000 Nm anforderte, baute sich ein Widerstand auf. Dabei entsprachen 1000 Nm einer Beschleunigungspedalstellung von 69 % oder mehr. Der Widerstand war also immer bei einer Pedalstellung von 70-100 % aktiv. Weiterhin war ein Widerstand aktiv, wenn mehr als 35 kW abgerufen wurden. Der Widerstand war dann auf dem gesamten Beschleunigungsbereich des Pedals (mehr als 30 % des Pedalwegs) zu spüren, denn die Leistung ist nicht abhängig von der Pedalstellung, sondern von einem Zusammenspiel aus Drehmoment und Geschwindigkeit. Der Widerstand erlosch erst, wenn eine Pedalstellung kleiner 30 % (also Segeln oder Rekuperieren) gewählt wurde oder weniger 35 kW abgerufen wurden. Das Überwinden der Widerstände erforderte eine Kraft von 10-15 Newton. Im Folgenden wird diese Bedingung mit **AAP_Lim** abgekürzt.

Das erweiterte aktive Beschleunigungspedal - Variante B. Das erweiterte aktive Beschleunigungspedal (im Folgenden **AAP+** genannt) sollte neben einem alternativen Algorithmus zur Vermeidung starker Beschleunigungen auch Widerstände aufgrund situationsspezifischer Informationen aktivieren, da aus den vorhergehenden Studie hervorgeht, dass die Beeinflussung des Geschwindigkeits- und Rekuperationsverhaltens den Verbrauch reduzieren kann. Zum Überwinden der Widerstände war ebenfalls eine Kraft von 10-15 Newton nötig. Ein Widerstand wurde mit der erweiterten Variante des aktiven Beschleunigungspedals immer dann aktiviert, wenn:

- a) die aktuelle Geschwindigkeitsbegrenzung um mehr als 10 % überschritten wurde. Der Widerstand war in dieser Zeit auf dem Beschleunigungsbereich des Pedals aktiv (>30 %). Wurde die Geschwindigkeitsbegrenzung um 10 % überschritten und gleichzeitig gesegelt oder rekuperiert, so war kein Widerstand aktiv.
- b) die Beschleunigung einen Wert von 1.7 m/s² überschritt. Der Widerstand war in dieser Zeit auf dem Beschleunigungsbereich des Pedals aktiv (>30 %).
- c) der Fahrer den Zeitpunkt erreichte, an dem er durch maximales Rekuperieren die bevorstehende Geschwindigkeitsbegrenzung direkt am entsprechenden Schild erreichen konnte. Spürte der Fahrer, beispielsweise beim Annähern an eine 70er-Zone, einen Widerstand auf dem Pedal und reagierte daraufhin mit vollständigem Lösen des Beschleunigungspedals, fuhr das Fahrzeug genau 70 km/h bei Erreichen

des Geschwindigkeitsschildes. Der Widerstand lag bis zum Erreichen der jeweiligen Geschwindigkeitsbegrenzung auf dem gesamten Pedal, um zu signalisieren, dass maximal rekuperiert werden sollte.

3.5.3.2 Die Teststrecke

Die Teststrecke war 9055 Meter lang und eine Durchfahrt dauerte etwa zehn Minuten. Sie bestand aus 44 Szenarien und war in weiten Teilen vergleichbar mit den Teststrecken der Studien I-III. Es gab darüber hinaus jeweils eine Situation im Außerorts- und Innerortsbereich, in denen die Fahrer ein langsames bzw. stehendes Fahrzeug überholen mussten (für eine detaillierte Streckenbeschreibung siehe im Anhang Tabelle 21).

3.5.3.3 Versuchsanordnung

Bei der vierten Studie handelt es sich um einen baseline-kontrollierten Messwiederholungsdesignversuch. Der Messwiederholungsfaktor ist vierstufig und umfasst die Baselinefahrt mit unlimitiertem Fahrzeug ohne aktives Beschleunigungspedal (BAS), eine Fahrt mit optimiertem Limitierungsmodus (LIM), eine Fahrt mit fahrzeugparameterabhängigem aktivem Beschleunigungspedal (AAP_LIM) und eine Fahrt mit erweitertem aktivem Beschleunigungspedal (AAP+). Die Baselinefahrt erfolgte für alle Fahrer zu Anfang des Versuches. Die Reihenfolge der Fahrten LIM, AAP_LIM und AAP+ wurde permutiert und war ausgeglichen.

3.5.3.4 Befragung

Zur Bewertung der Akzeptanz der Maßnahmen wurde der Kurzfragebogen von Van Der Laan, Heino und De Waard (1997) nach jeder Fahrt, außer der Baselinefahrt, vorgelegt (siehe hierzu im Anhang Kapitel 6.4.1.1 „Fragebogen zur Bewertung des Limitierungsansatzes und des aktiven Beschleunigungspedals“). Der Fragebogen besteht aus zwei Faktoren, nämlich „Satisfaction“ und „Usability“. Mit dem Faktor „Satisfaction“ werden hierbei Eigenschaften erfragt, die der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit zugeschrieben werden können (beispielsweise angenehm oder nervig), während mit dem Faktor „Usability“ eher der wahrgenommene Nutzen abgefragt wird (beispielsweise nützlich oder wirkungsvoll). Die beiden Faktoren werden daher im Ergebnisteil entsprechend benannt (Satisfaction – Benutzerfreundlichkeit, Usability – Nützlichkeit). Da es Hinweise in der Literatur gibt, dass das aktive Beschleunigungspedal negative Auswirkungen auf die Beanspruchung haben kann, wurde darüber hinaus nach jeder Fahrt der NASA-TLX-Fragebogen ausgefüllt (vgl. hierzu im Anhang Kapitel 6.4.1.2 „Nasa R-TLX“). Am Ende jeder Fahrt (außer der Baselinefahrt) beantworteten die Fahrer schließlich folgende offene Fragen:

- Was fanden Sie an der jeweiligen Maßnahme gut, was fanden Sie schlecht?
- In welchen Situationen hat Sie welche Maßnahme besonders gestört?

Am Ende des Versuches, wurden die Fahrer gebeten, diejenige Maßnahme zu nennen, die sie favorisieren und dies zu begründen. Darüber hinaus sollten sie angeben, wie ihre Einstellung gegenüber dem Limitierungsansatz bzw. gegenüber einem aktiven Beschleunigungspedal ist und ob sie eine derartige Unterstützung gerne in ihren Fahrzeugen hätten. Im Ergebnisteil werden nur die wichtigsten subjektiven Ergebnisse

präsentiert. Die Antworten auf verbleibende Fragen sind der Übersichtlichkeit wegen tabellarisch im Anhang aufgeführt (siehe Appendix Kapitel 6.3.4.2 „Weitere Interviewdaten“).

3.5.3.5 Ablauf

Zu Beginn erfolgte eine Eingewöhnungsfahrt, welche zum Ziel hatte, sich an das Elektroauto im Allgemeinen zu gewöhnen und das kombinierte Fahrbremspedal kennenzulernen. Alle Fahrer begannen dann den Versuch mit der Baselinefahrt. Die Fahrer wurden instruiert, so zu fahren, wie sie es immer täten. Im Anschluss durchfuhren die Fahrer die gleiche Strecke drei Mal mit dem Limitierungsansatz, dem aktiven Beschleunigungspedal in der Bedingung AAP_Lim und dem aktiven Beschleunigungspedal in der Bedingung AAP+ in über alle Fahrer ausgeglichener permutierter Reihenfolge. Nach jeder Fahrt und am Ende aller Fahrten wurden die Fahrer mittels Fragebögen aber auch in offenen Interviews befragt. Zum Schluss erhielten die Fahrer eine Aufwandsentschädigung.

3.5.3.6 Datenaufbereitung, statistische Auswertung und Messparameter

Die Aufbereitung der Daten, deren statistische Auswertung und die Auswahl der Messparameter entspricht dem Vorgehen der vorhergehenden Studien. Die darüber hinaus ausgewerteten Parameter, sowie die Auswertung der Beanspruchungs- und Akzeptanzfragebögen werden im Folgenden näher beschrieben.

Widerstände und Pedalverhalten

In den Bedingungen AAP_Lim und AAP+ führten die unterschiedlichen zugrunde liegenden Algorithmen dazu, dass die Widerstände unterschiedlich oft und unterschiedlich lange aktiv waren. Um einen Überblick zu erhalten, wieviel Prozent der Zeit (gemessen an einer Fahrt) die Fahrer einen Widerstand spürten, wird ermittelt, warum und wie lange ein Widerstand auf dem Pedal aktiv war. In der Bedingung AAP_Lim kann das entweder aufgrund der Anforderung eines zu hohen Drehmoments oder zu hohen Leistung sein. In der Bedingung AAP+ kann der Grund für einen Widerstand zu starkes Beschleunigen, der Geschwindigkeitshinweis oder der Rekuperationshinweis sein. Weiterhin wird untersucht, wieviel Prozent der Zeit in den jeweiligen Bedingungen ein Pedalweg größer 90 % betätigt wurde. In der Bedingung mit Limitierung bewirkt ein Überschreiten dieser Schwelle (also des Kick-Downs) die Deaktivierung der Limitierung.

Workload

Die Belastung und Beanspruchung wird mit Hilfe des Fragebogens NASA-TLX erhoben, wobei lediglich die sogenannte Raw-Version durchgeführt wird, also der paarweise Vergleich entfällt (siehe hierzu Hart, 2006). Jeder Fahrer bewertet die Fragen bezüglich geistiger, körperlicher und zeitlicher Anforderung, der eigenen Leistung, der Anstrengung und Frustration anhand einer zwanzigstufigen unipolaren Skala mit den Polen „gering“ und „hoch“. Darauf basierend wird ein Gesamtscore aus der Summe der jeweiligen Skalen berechnet, der Werte zwischen 0-120 annehmen kann. Berechnet wird zunächst eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (4 Stufen) mit anschließenden Post-hoc Tests bei gegebener Signifikanz. Weiterhin werden bei vorliegender Signifikanz des Gesamtscores

die beiden Unterskalen Belastung (geistige, körperliche und zeitliche Anforderung) und Beanspruchung (Leistung, Anstrengung, Frustration) auf Unterschiede entsprechend dem Vorgehen der Auswertung des Gesamtscores getestet.

Akzeptanz und Gebrauchstauglichkeit

Die Benutzerfreundlichkeit und der Nutzen wird mittels eines Fragebogens von Van Der Laan et al. (1997) erfasst, der aus elf Fragen besteht. Für jeden der zwei Faktoren des Fragebogens wird je eine Varianzanalyse mit Messwiederholung und gegebenenfalls t-Tests für abhängige Stichproben bei signifikanten Haupteffekten berechnet.

3.5.4 Ergebnisse

Insgesamt nahmen 19 Probanden an dem Versuch teil. Bei einem Probanden gab es ein Aufzeichnungsproblem der Simulatordaten, weswegen die Analyse dieser Daten nur auf 18 Probanden basiert. Da es sich lediglich um einen Aufzeichnungsfehler handelte, der generelle Versuch aber ohne Vorfälle verlief, umfassen die Befragungsdaten die Antworten aller 19 Probanden.

3.5.4.1 Fahrverhalten

Im Folgenden wird das Fahr- und Pedalverhalten in den jeweiligen Bedingungen berichtet (vgl. Tabelle 13 für die entsprechenden Deskriptiva und Tabelle 14 für entsprechende Post-hoc-Tests):

- + In jeder Versuchsbedingung wurde im Vergleich zu BAS **langsamer gefahren**, $F(3, 51) = 8.38, p < .001, \eta_p^2 = .330$. Am langsamsten wurde in der Bedingung AAP+ gefahren. In den Bedingungen AAP_LIM und LIM wurde vergleichbar schnell gefahren.
- + Im Vergleich zu BAS, war die **Standardabweichung der Geschwindigkeit** in allen Fahrten geringer, $F(3, 51) = 24.15, p < .001, \eta_p^2 = .587$, wobei alle Post-hoc-Tests signifikant sind (BAS>AAP+>LIM>AAP_Lim).
- + Mit allen Maßnahmen wurde im Vergleich zu BAS signifikant schwächer **positiv beschleunigt**, $F(3, 51) = 27.79, p < .001, \eta_p^2 = .620$. In den Bedingungen AAP_Lim und LIM wurde vergleichbar beschleunigt, aber signifikant schwächer als in der Bedingung AAP+.
- + Mit allen Maßnahmen wurde im Vergleich zu BAS signifikant **schwächer verzögert (inkl. Nutzung der hydraulischen Bremse)**, $F(3, 51) = 14.24, p < .001, \eta_p^2 = .456$.
- + In den Bedingungen BAS und AAP+ wurde stärker **rekuperativ verzögert** als in den Bedingungen AAP_Lim und LIM, $F(3, 51) = 8.33, p < .001, \eta_p^2 = .329$.
- + **Hydraulisch gebremst** wurde am längsten in der Bedingung BAS und am wenigsten in der Bedingung AAP+, $F(3, 51) = 18.16, p < .001, \eta_p^2 = .517$. In den Bedingungen AAP_LIM und LIM wurde vergleichbar lang hydraulisch gebremst.
- + In den Bedingungen AAP+ und BAS wurde signifikant **länger rekuperiert** als in den Bedingungen AAP_Lim und LIM, $F(3, 51) = 5.61, p < .001, \eta_p^2 = .248$.

- + Es gibt einen signifikanten Effekt auf den Anteil der Zeit, in dem **gesegelt** wurde, $F(3, 51) = 3.90$, $p = .014$, $\eta_p^2 = .187$. Dieser Effekt ist auf die Bedingung LIM zurückzuführen, in der besonders wenig gesegelt wurde.

Der Limitierungsansatz und das aktive Beschleunigungspedal in der Bedingung AAP_Lim bewirkten ein nahezu vergleichbares Fahrverhalten: Es wurde langsamer gefahren, die Geschwindigkeit wurde konstanter gehalten, es wurde schwächer beschleunigt und schwächer sowie kürzer verzögert. In der Bedingung LIM wurde allerdings weniger gesegelt als in allen anderen Bedingungen.

Das Fahrverhalten in der Bedingung AAP+ war nahezu vergleichbar mit dem in den Bedingungen LIM und AAP_Lim (geringere mittlere Geschwindigkeit, konstanteres Halten der Geschwindigkeit und geringere Beschleunigungen verglichen mit BAS), allerdings wurde unterschiedlich verzögert. In der Bedingung AAP+ wurde gleichermaßen stark wie in der Baselinefahrt verzögert und vergleichbar lange rekuperiert, während in den Bedingungen AAP_Lim und LIM im Vergleich dazu schwächer und kürzer rekuperiert wurde. Zudem wurde die hydraulische Bremse in der Bedingung AAP+ im Vergleich zu allen anderen Bedingungen am seltensten genutzt.

Tabelle 13: Mittelwerte und Standardabweichungen für diverse Fahrverhaltensparameter.

	BAS	LIM	AAP_LIM	AAP+
Mittl. Geschwindigkeit	63.03 (2.44)	61.42 (2.30)	60.95 (3.41)	59.67 (3.24)
SD Geschwindigkeit	30.59 (2.75)	27.75 (1.56)	26.68 (1.32)	28.74 (1.28)
Mittl. Beschl. (ax>0)	0.72 (0.11)	0.54 (0.07)	0.54 (0.08)	0.58 (0.12)
Mittl. Verzög. (ax<0; RB + HB)	-0.66 (0.13)	-0.57 (0.09)	-0.54 (0.09)	-0.55 (0.08)
Mittl. Verzög. (ax<0; nur RB)	-0.54 (0.11)	-0.49 (0.07)	-0.46 (0.05)	-0.52 (0.07)
% der Zeit HB genutzt	3.03 (2.35)	2.04 (2.16)	1.93 (1.81)	0.82 (1.23)
% der Zeit RB genutzt	22.98 (3.73)	20.45 (3.04)	20.37 (2.56)	22.21 (3.00)
% der Zeit gesegelt	13.88 (3.41)	10.70 (3.05)	12.21 (3.25)	12.91 (3.25)

Tabelle 14: Ergebnisse von Post-hoc-Tests für diverse Fahrverhaltensparameter.

Parameter	BAS LIM	vs. BAS AAP_Lim	vs. BAS AAP+	vs. LIM AAP_Lim	vs. LIM AAP+	vs. AAP_Lim vs. AAP+
Mittl. Geschwindigkeit	$t(17) = 2.42$, $p = .027$	$t(17) = 2.38$, $p = .029$	$t(17) = 3.95$, $p = .001$	$t(17) = -0.98$, $p = .342$	$t(17) = -3.03$, $p = .008$	$t(17) = 2.47$, $p = .024$
SD Geschwindigkeit	$t(17) = 4.36$, $p < .001$	$t(17) = -6.82$, $p < .001$	$t(17) = 3.10$, $p = .006$	$t(17) = -3.50$, $p = .003$	$t(17) = 3.24$, $p = .005$	$t(17) = -7.50$, $p < .001$
Mittl. Beschl. (ax>0)	$t(17) = 6.95$, $p < .001$	$t(17) = -6.17$, $p < .001$	$t(17) = 4.77$, $p < .001$	$t(17) = 0.41$, $p = .690$	$t(17) = 2.88$, $p = .010$	$t(17) = -2.24$, $p = .038$
Mittl. Verzög. (ax<0; RB + HB)	$t(17) = -3.27$, $p = .005$	$t(17) = 4.88$, $p < .000$	$t(17) = -4.67$, $p < .000$	$t(17) = 2.39$, $p = .029$	$t(17) = 1.29$, $p = .213$	$t(17) = 0.91$, $p = .375$
Mittl. Verzög. (ax<0; nur RB)	$t(17) = -2.48$, $p = .024$	$t(17) = 4.45$, $p < .001$	$t(17) = -0.82$, $p = .423$	$t(17) = 2.35$, $p = .031$	$t(17) = -2.08$, $p = .053$	$t(17) = 4.40$, $p < .001$
% der Zeit HB genutzt	$t(17) = 2.66$, $p = .017$	$t(17) = -3.69$, $p = .002$	$t(17) = 5.57$, $p < .001$	$t(17) = -0.67$, $p = .512$	$t(17) = -4.26$, $p = .001$	$t(17) = 5.323$, $p < .001$
% der Zeit RB genutzt	$t(17) = 2.77$, $p = .013$	$t(17) = -2.98$, $p = .008$	$t(17) = 0.79$, $p = .439$	$t(17) = -0.15$, $p = .881$	$t(17) = 2.49$, $p = .024$	$t(17) = -3.26$, $p = .005$
% der Zeit gesegelt	$t(17) = 2.77$, $p = .013$	$t(17) = 1.61$, $p = .127$	$t(17) = 0.87$, $p = .397$	$t(17) = 1.79$, $p = .091$	$t(17) = 2.76$, $p = .013$	$t(17) = -0.97$, $p = .345$

In Abbildung 45 (links) ist der Anteil der Zeit, in dem eine Pedalstellung größer 90% gewählt wurde dargestellt. Dies ist der Bereich, in dem auch in der Bedingung LIM die maximale Leistung und das maximale Drehmoment abgerufen werden konnte (nach Überwinden des sogenannten Kick-Downs). Diese Pedalstellung wurde unterschiedlich lange gewählt, $F(3, 51) = 3.13$, $p = .033$, $\eta_p^2 = .156$, am längsten in der Baselinefahrt. In der Bedingung LIM wurde der Kick-Down deskriptiv zwar häufiger als in den Bedingungen mit aktivem Beschleunigungspedal, aber immer noch weniger als in der Baselinefahrt betätigt. Dieser Unterschied wird jedoch nicht signifikant, $t(17) = 0.98$, $p = .340$.

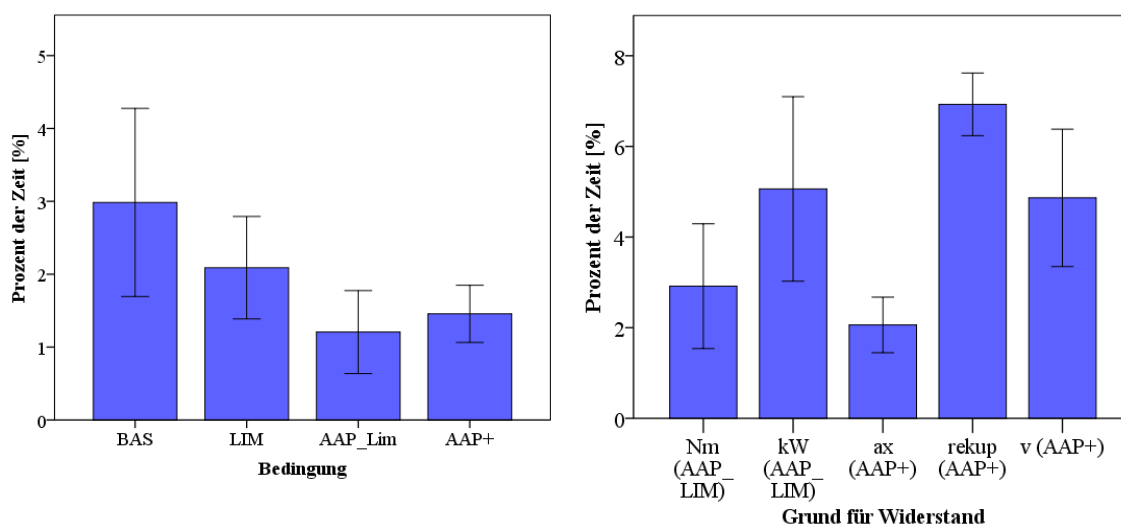


Abbildung 45: Prozent der Zeit, in der eine Pedalstellung > 90% gewählt wurde (links) und in der ein Widerstand aktiv war (rechts). Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

In Abbildung 45 (rechts) wird der Anteil der Zeit (gemessen an der gesamten Fahrt) dargestellt, in der ein Widerstand aktiv war. In der Summe war in der Fahrt mit AAP+ der Widerstand im Mittel 13.9 % Prozent und somit signifikant länger aktiv als in der Bedingung AAP_Lim, in der im Mittel 8.0 % der Zeit ein Widerstand aktiv war, $t(17) = -3.74$, $p = .002$.

3.5.4.2 Verbrauch

Mit allen drei Maßnahmen war der Verbrauch im Vergleich zur Baselinefahrt signifikant geringer, $F(3, 51) = 40.61$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .705$ (s. Abbildung 46). Am wenigsten verbrauchten die Fahrer in der Bedingung AAP_Lim. Der Verbrauch in den Bedingungen LIM und AAP+ war vergleichbar (vgl. Tabelle 31 im Appendix mit den entsprechenden Teststatistiken). Weiterhin wurde in jeder Bedingung im Vergleich zur Baselinefahrt sowohl weniger Energie entnommen, $F(3, 51) = 32.36$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .656$, als auch weniger Energie rekuperiert, $F(3, 51) = 19.16$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .530$. Tabelle 15 zeigt die entsprechenden Deskriptiva. In der Bedingung AAP+ wurde (nach BAS) die meiste Energie rekuperiert, aber gleichzeitig auch die meisten Energie aus der Batterie entnommen. In der Bedingung AAP_Lim wurde am wenigsten Energie aus der Batterie

entnommen und mit LIM und AAP_Lim wurde gleichermaßen am wenigsten Energie rekuperiert (vgl. Tabelle 32 im Anhang mit den entsprechenden Teststatistiken).

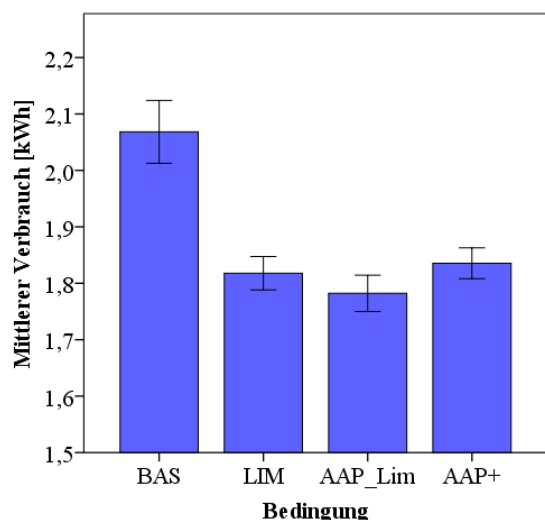


Abbildung 46: Gesamtverbrauch. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

Tabelle 15: Mittelwerte und Standardabweichungen für entnommene (kWh ent.) und rekuperierte Leistung (kWh rekup.).

Parameter	Bedingung	M
kWh ent.	BAS	2.76 (0.31)
	LIM	2.34 (0.21)
	AAP_Lim	2.28 (0.23)
	AAP+	2.41 (0.25)
kWh rekup.	BAS	-0.69 (0.17)
	LIM	-0.52 (0.10)
	AAP_Lim	-0.50 (0.10)
	AAP+	-0.58 (0.12)

3.5.4.3 Situationsanalyse

Wie bereits in den vorhergehenden drei Studien wurde überprüft, in welchen Situationen die jeweilige Maßnahme einen Effekt auf den Verbrauch hatte. Hierzu wurde zunächst eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung berechnet, mit dem Faktor „Situation“ (44 Stufen) und dem Faktor „Bedingung“ (vier Stufen). Beide Haupteffekte sowie die Interaktion werden hochsignifikant:

- Haupteffekt Situation: $F(43, 731) = 798.43, p < .001, \eta_p^2 = .979$
- Haupteffekt Bedingung: $F(3, 51) = 40.61, p < .001, \eta_p^2 = .705$
- Interaktion Situation x Bedingung: $F(129, 2193) = 3.36, p < .001, \eta_p^2 = .165$.

Es folgte eine Analyse für jeden Streckenabschnitt. Eine Auflistung dieser Analyse befindet sich im Anhang in Tabelle 37. Wenn es Effekt der Bedingung in einer Situation gab, so wurde das Fahrverhalten im Detail betrachtet, um den Grund für den Verbrauchsunterschied zu finden. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammenfassend beschrieben.

Insgesamt gab es in zwanzig Situationen einen signifikanten Effekt der Bedingung auf den Energieverbrauch. Wenn im **niedrigen Geschwindigkeitsbereich** (0-40 km/h) beschleunigt wurde, ist mit jedem der Energiesparassistenten weniger Energie verbraucht worden als in der Baselinefahrt. Mit LIM und AAP_Lim war der Energieverbrauch beim Beschleunigen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich (0-40 km/h) am geringsten. Zwar wurde in diesen Situationen mit AAP+ ebenfalls weniger Energie verbraucht als in BAS, allerdings war in der Bedingung AAP_Lim länger ein Widerstand aktiv. Mit LIM verbrauchten die Fahrer in diesen Situationen meist vergleichbar wenig Energie wie mit AAP_Lim, da der Kick-Down nur selten gedrückt wurde. Wurde im **hohen**

Geschwindigkeitsbereich leicht beschleunigt ($<1 \text{ m/s}^2$), gab es meist keine Unterschiede mehr zwischen LIM, AAP_Lim und AAP+. Mit allen Assistenten war der Verbrauch vergleichbar und geringer im Vergleich zu BAS. Wenn hingegen im hohen Geschwindigkeitsbereich stärker beschleunigt ($>1 \text{ m/s}^2$) wurde, dann war der Verbrauch mit AAP_Lim am geringsten. Der Grund hierfür ist, dass mit AAP_Lim (anders als mit LIM und AAP+) ein Widerstand, bedingt durch die Überschreitung des Leistungsgrenzwertes (35 kW), aktiv war.

In Situationen, in denen sich die Fahrer einer Geschwindigkeitsbegrenzung näherten, wurde mit AAP+ am wenigsten Energie verbraucht bzw. am meisten Energie rekuperiert. Der Grund hierfür ist der Rekuperationshinweis. Mit AAP+ wurde darüber hinaus im Vergleich zu BAS, AAP_Lim und LIM in Situationen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen ($<100 \text{ km/h}$) auf Grund des Geschwindigkeitshinweis weniger Energie verbraucht. Tabelle 16 fasst zusammen, in welchen Fahrsituationen welche Bedingung einen Effekt auf den Verbrauch hatte.

Tabelle 16: Zusammenfassung der Fahrsituationen, in denen abhängig von der Versuchsbedingung am wenigsten Energie verbraucht wurde.

LIM	AAP_Lim	AAP+
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschleunigen bei niedrigen Geschwindigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschleunigen bei niedrigen Geschwindigkeiten ▪ Beschleunigen bei hohen Geschwindigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschleunigen bei niedrigen Geschwindigkeiten ▪ Einhalten der Geschwindigkeit bei Geschwindigkeitsbegrenzungen ▪ frühzeitiges Rekuperieren bei bevorstehenden Geschwindigkeitsbegrenzungen

Situationen, in denen verglichen mit der Baselinefahrt mehr Energie verbraucht wurde, sind wie in den vorherigen Studien solche, in denen immer noch beschleunigt wurde, während in der Baseline-Fahrt (oder in den anderen Bedingungen) die jeweilige Zielgeschwindigkeit bereits erreicht wurde. In einer Situation wird ein Lerneffekt vermutet, da in diesem Abschnitt zwischen zwei Kurven in der Baselinefahrt langsamer gefahren wurde als in allen drei folgenden Fahrten. Vermutlich waren die Fahrer an dieser Stelle während der ersten Fahrt noch unsicher.

3.5.4.4 Fahrertypenanalyse

Abbildung 47 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Verbrauchswerte in der Baselinefahrt. Aufgrund der schiefen Verteilung und zweier Modi wird anders als bisher der Fahrertyp in drei Gruppen unterteilt: Sportliche (die sechs ineffizientesten in der Baselinefahrt), effiziente (die sechs effizientesten in der Baselinefahrt) und durchschnittliche Fahrer (die sechs Fahrer, die weder zu den effizienten noch sportlichen Fahrern gehören).

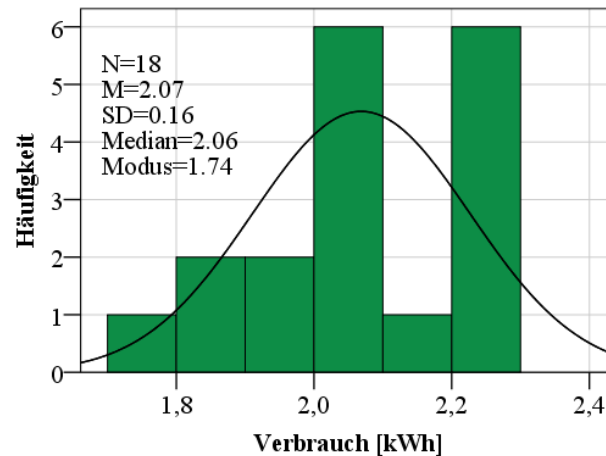


Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung des Verbrauches in der Baselinefahrt.

Der Vergleich der drei Fahrertypen zeigte:

- keinen signifikanten Effekt auf die mittlere Geschwindigkeit, $F(2, 17) < 1$.
- keinen signifikanten Effekt auf die Standardabweichung der Geschwindigkeit, $F(2, 17) < 1$.
- einen signifikanten Effekt auf die positive Beschleunigung, $F(2, 17) = 10.45$, $p = .001$ (Effiziente < Normale < Sportliche).
- einen signifikanten Effekt auf negative Beschleunigung, $F(2, 17) = 8.86$, $p = .003$ (Effiziente < Normale < Sportliche).
- einen signifikanten Effekt auf die negative Beschleunigung, wenn nur mit rekuperativer Bremse verzögert wurde, $F(2, 17) = 12.54$, $p = .001$ (Effiziente < Normale < Sportliche).

In einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit dem ersten Faktor „Versuchsbedingung“ (abhängig, vier Stufen) und dem zweiten Faktor „Fahrertyp“ (unabhängig, drei Stufen) erbrachte nachfolgende Ergebnisse:

1. Haupteffekt Versuchsbedingung: $F(3, 45) = 54.99$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .786$
2. Haupteffekt Fahrertyp: $F(2, 15) = 6.13$, $p = .010$, $\eta_p^2 = .457$
3. Interaktion Versuchsbedingung X Fahrertyp: $F(6, 45) = 4.01$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .348$.

Abbildung 48 zeigt den Verbrauch je Versuchsbedingung und Fahrertyp. Sportliche Fahrer verbrauchen signifikant mehr Energie als effiziente Fahrer ($p = .003$), aber nicht signifikant mehr als „normale“ Fahrer ($p = .111$). „Effiziente“ Fahrer verbrauchen tendenziell weniger Energie als „normale“ Fahrer ($p = .083$). Die signifikante Interaktion ist darauf zurückzuführen, dass in den Bedingungen LIM, AAP_Lim und AAP+ alle Fahrertypen vergleichbar viel Energie verbrauchten, während dies in der Baselinefahrt nicht zutrifft (effizient < normal < sportlich). Einzig in der Bedingung AAP+ verbrauchen „sportliche“ Fahrer signifikant mehr Energie als effiziente Fahrer, $t(10) = -2.26$, $p = .048$ (vgl. hierzu Tabelle 38 im Appendix).

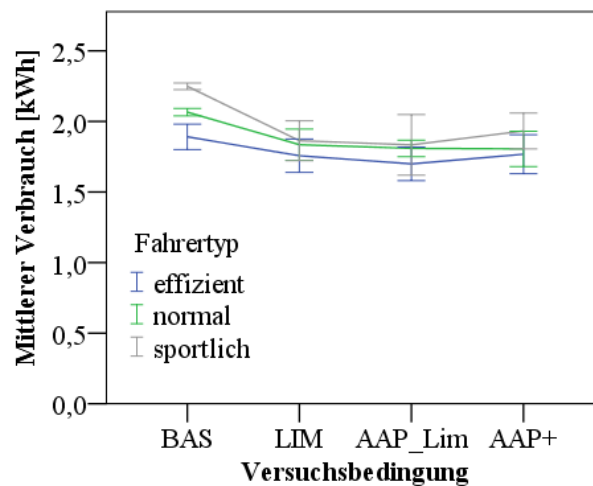


Abbildung 48: Verbrauch je Bedingung und Fahrertyp. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95 %-Konfidenzintervallen.

Obwohl im Mittel unabhängig vom Fahrstil mit jeder Maßnahme tendenziell gleichermaßen viel Energie verbraucht wurde, gibt es immer noch, wie in Studie III, große interindividuelle Unterschiede innerhalb einer Bedingung: In der Bedingung AAP_Lim ist der Verbrauch des effizientesten Fahrers etwa 30 % geringer als der des ineffizientesten Fahrers. In der Bedingung LIM liegt der Unterschied zwischen effizientestem und ineffizientestem Fahrer bei etwa 20 %, in der Bedingung AAP+ bei etwa 23 %. Für ineffiziente Fahrer bleibt selbst mit der effektivsten Maßnahme weiterhin ein erwähnenswertes Potential, das Fahrverhalten und somit den Verbrauch weiter zu optimieren.

3.5.4.5 Befragungsdaten

Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit

Die Benutzerfreundlichkeit, $F(2, 36) = 2.70$, $p = .081$, $\eta_p^2 = .130$, und Nützlichkeit, $F(2, 36) = 9.52$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .346$, wurden in den verschiedenen Bedingungen unterschiedlich wahrgenommen. Wie in Abbildung 49 zu sehen ist, wurde der Limitierungsansatz sowie das aktive Beschleunigungspedal in der Bedingung AAP+ als gleichermaßen nützlich bewertet (vgl. Tabelle 17). Der Limitierungsansatz wurde hierbei auch als benutzerfreundlich bewertet, während beide Varianten des aktiven Beschleunigungspedals als eher benutzerunfreundlich eingeschätzt wurden. Am unzufriedensten waren die Fahrer hierbei mit der Variante AAP_Lim.

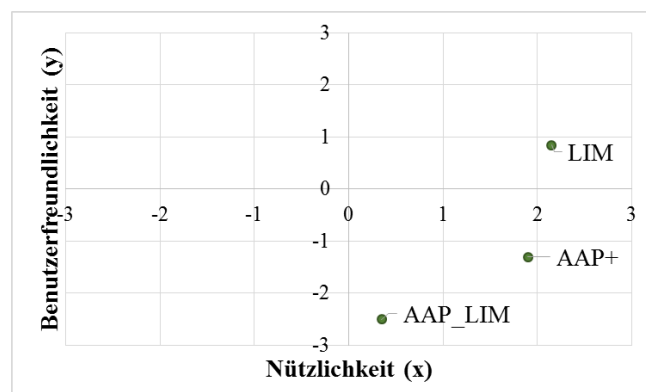


Abbildung 49: Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit. Dargestellt sind Mittelwerte.

Tabelle 17: Ergebnisse von *t*-Tests für abhängige Stichproben für die Faktoren des Akzeptanzfragebogens.

Vergleich	Teststatistik	
	Nützlichkeit	Benutzerfreundlichkeit
LIM vs. AAP_LIM	$t(18) = 2.15, p = .045$	$t(18) = 4.30, p < .001$
LIM vs. AAP+	$t(18) = 0.28, p = .780$	$t(18) = 2.50, p = .023$
AAP_LIM vs. AAP+	$t(18) = -2.12, p = .048$	$t(18) = -1.76, p = .095$

Workload

Die Art der Unterstützung hatte einen signifikanten Einfluss auf den Workload-Gesamtwert, $F(3, 54) = 8.75, p < .001, \eta_p^2 = .327$ sowie auf die Unterskalen „Belastung“, $F(3, 54) = 5.44, p = .002, \eta_p^2 = .232$, und „Beanspruchung“, $F(3, 54) = 9.59, p < .001, \eta_p^2 = .347$. Mit aktivem Beschleunigungspedal in der Bedingung AAP+ und in der Baselinefahrt waren Belastung und Beanspruchung vergleichbar. Die Limitierung führte dazu, dass eine geringere Belastung und Beanspruchung wahrgenommen wurde, während mit aktivem Beschleunigungspedal in der Bedingung AAP_Lim die Fahrt belastender und beanspruchender im Vergleich zur Baselinefahrt wahrgenommen wurde (siehe Abbildung 50 und Tabelle 18).

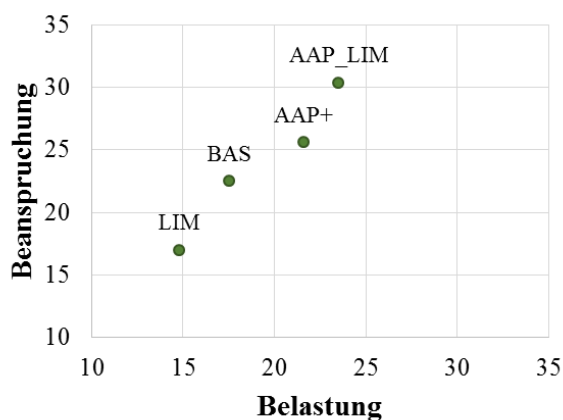


Abbildung 50: Belastung und Beanspruchung je Versuchsbedingung. Dargestellt sind Mittelwerte.

Tabelle 18: Ergebnisse von t-Tests für abhängige Stichproben für den Gesamtscore des Nasa-TLX.

Vergleich	Teststatistik
BAS vs. LIM	$t(18) = -2.11, p = .049$
BAS vs. AAP_LIM	$t(18) = 2.96, p = .008$
BAS vs. AAP+	$t(18) = 1.62, p = .124$
LIM vs. AAP_LIM	$t(18) = 4.39, p < .001$
LIM vs. AAP+	$t(18) = 2.84, p = .011$
AAP_LIM vs. AAP+	$t(18) = -1.93, p = .070$

Interviewdaten

63 % der Probanden und weitere 16 % unter Einschränkungen bewerteten am Ende des Versuches den Limitierungsansatz positiv. Weiterhin favorisierten 12 von 19 Fahrern den Limitierungsansatz, während das aktive Beschleunigungspedal in der Bedingung AAP_Lim von knapp der Hälfte aller Fahrer abgelehnt wurde und von nur einem Fahrer favorisiert wurde. Das aktive Beschleunigungspedal in der Bedingung AAP+ wurde von 48% und unter Einschränkungen von weiteren 37% positiv bewertet. 26 % der Fahrer favorisierten diese Bedingung (vgl. Tabelle 33 im Appendix). Vor allem der Rekuperationshinweis in der Bedingung AAP+ müsse laut Probanden verbessert werden, weil beim Anfahren an Kreuzungen ein Widerstand aktiv war, andernfalls wäre die Bewertung positiver ausgefallen, so die meisten Fahrer. Dies hatte programmiertechnische Gründe. Eine Möglichkeit den Hinweis zu verändern, wäre beispielsweise die Aktivierung eines einmaligen Impulses anstelle eines dauerhaften Widerstandes, in dem Moment, in dem der Fahrer voll zu rekuperieren beginnen sollte.

Die Veränderung des Fahrzeugverhaltens durch die Limitierungen von Drehmoment und Leistung war laut der Fahrer wenig spürbar, weshalb sich diese, wenn überhaupt, nur selten gestört gefühlt haben. Dies ist zwar mehrfach als positiver Aspekt genannt worden, obgleich der wahrgenommene Nutzen dadurch gemindert wurde. Hierbei könnte eine Anzeige, welche die hinzugewonnene Reichweite darstellt, laut Probanden helfen. Positiv an einem aktiven Beschleunigungspedal im Allgemeinen wurde bewertet, dass man eine haptische Rückmeldung erhält und diese direkt am Fuß gegeben wird und dadurch weniger häufig auf die Leistungsanzeige geblickt werden muss, um zu sehen, ob man energieeffizient fährt. Insbesondere in der Bedingung AAP_Lim empfanden die Fahrer die Funktionsweise des Widerstandes aber als nahezu durchgehend störend (z.B. sprunghaftes Ansteigen des Widerstandes, starke Widerstände, Pulsieren, wenn man versucht sich an den Widerstand anzulehnen). Sie fühlten sich zudem bevormundet und genervt. In der Bedingung AAP+ wurde das aktive Beschleunigungspedal generell positiver bewertet als in der Bedingung AAP_Lim, vor allem weil der Grund für die Widerstände laut Fahrern nachvollziehbarer war. In Zusammenhang mit beiden Varianten des aktiven Beschleunigungspedals wurde mehrfach der Wunsch geäußert, die Gründe und Grenzwerte für einen Widerstand individuell zu verändern. Für weitere Ergebnisse aus der abschließenden Befragung siehe Tabelle 33-Tabelle 36 im Appendix.

3.5.5 Diskussion

Das Ziel der vierten Studie war, die Wirksamkeit und Akzeptanz eines optimierten Limitierungsansatzes und eines aktiven Beschleunigungspedals zu überprüfen, diese Ansätze miteinander zu vergleichen und zu evaluieren, welche Maßnahme zu bevorzugen ist. Ein weiteres Ziel war zu untersuchen, inwiefern ein aktives Beschleunigungspedal dazu genutzt werden kann, energieoptimales Rekuperieren zu fördern. Auf Grund der zahlreichen Programmier- und Funktionsmöglichkeiten und somit unterschiedlicher Einflussnahme auf das Fahrverhalten wurden zwei Varianten des aktiven Beschleunigungspedals implementiert und untersucht. Zum einen wurde eine fahrzeugparameterabhängige Variante (A) und zum anderen eine erweiterte Variante, die zusätzlich situationspezifische Hinweise erzeugt (B), evaluiert.

Sowohl mit dem Limitierungsansatz als auch mit beiden Varianten eines aktiven Beschleunigungspedals wurde ein energieeffizientes Fahrverhalten gefördert, welches den Energieverbrauch im Gegensatz zur Baselinefahrt signifikant reduzierte, wobei mit der rein fahrzeugparameterabhängigen Variante des aktiven Beschleunigungspedal am effizientesten gefahren wurde. Dass mit Hilfe eines aktiven Beschleunigungspedals die Energieeffizienz gesteigert werden kann, deckt sich mit den Befunden von Azzi et al. (2011); Várhelyi et al. (2002). Der optimierte Limitierungsansatz förderte ein Fahrverhalten, das aus Studie III bereits bekannt ist. Die parallele Limitierung von Drehmoment und Leistung wirkte synergetisch zusammen. Dies wird aus den Situationen, in denen der Limitierungsansatz die Energieeffizienz steigert, deutlich. Sowohl das Fahrverhalten in niedrigen als auch hohen Geschwindigkeiten konnte auf diese Weise verbessert werden. Insgesamt wurde vor allem das Beschleunigungsverhalten optimiert und das Fahrverhalten wurde gleichmäßiger. Des Weiteren wurde trotz der Implementierung eines Kick-Downs und der Reduktion der Limitierung eine zufriedenstellende Energieeffizienzsteigerung erreicht. Die Befürchtung, dass der Kick-Down häufig genutzt wird und dadurch der Energieeinspareffekt aufgehoben werde, konnte nicht bestätigt werden. Vielmehr war die Stärke der Limitierung zwar ausreichend, um das Fahrverhalten positiv zu beeinflussen und den Verbrauch zu verringern, aber gleichzeitig schwach genug, sodass Fahrer nur selten das Bedürfnis hatten, die Limitierung zu überstimmen (s.u.).

Die kognitive Beanspruchung war bei Fahrten mit der Limitierung im Vergleich zur Baselinefahrt geringer. Der Grund hierfür könnte darin liegen, dass das veränderte Fahrzeugverhalten zu einem „entspannten“ Fahrstil beitrug. Die Effektivität des Limitierungsansatzes wurde jedoch angezweifelt, da die Veränderung des Fahrverhaltens kaum bemerkt wurde. Der wahrgenommene Nutzen des Limitierungsansatzes könnte beispielsweise über eine Anzeige gesteigert werden, welche die Energieeinsparung oder die Reichweitensteigerung darstellt. Allerdings gilt es hierbei abzuwägen, inwiefern die gesteigerte visuelle Ablenkung durch eine solche Anzeige annehmbar ist. Abschließend ist aber den Kritikpunkten des Limitierungsansatzes, wie er in Studie III implementiert war, hinreichend begegnet und die Akzeptanz dadurch zufriedenstellend gesteigert, Eco-Driving wirksam gefördert und für das vorliegende Fahrzeugmodell eine geeignete Limitierungsstärke bestimmt worden.

Ein Vergleich des Limitierungsansatzes mit den beiden Varianten des aktiven Beschleunigungspedals zeigt, dass mit allen Ansätzen ein nahezu vergleichbares Fahrverhalten gefördert wurde. Die situationsspezifischen Hinweise in der erweiterten Variante des aktiven Beschleunigungspedals (Variante B) führten darüber hinaus dazu, dass in Abgrenzung zu den anderen beiden Bedingungen, stärker rekuperativ verzögert und somit mehr Energie rekuperiert wurde. Dies kann dem Rekuperationshinweis zugeschrieben werden. Darüber hinaus führte der Geschwindigkeitshinweis des aktiven Beschleunigungspedals in Situationen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen verglichen mit den verbleibenden Bedingungen zu einem geringeren Verbrauch. Die Analyse der Befragungsdaten zeigt, dass, während der Limitierungsansatz größtenteils positiv bewertet und favorisiert, das aktive Beschleunigungspedal bemängelt wurde. Die erweiterte Variante B wurde hierbei positiver bewertet als die rein fahrzeug-parameterabhängige Variante A und das obwohl mit ersterer länger und häufiger ein Widerstand aktiv war. Die Fahrer begründeten dies damit, dass der Grund für einen aktiven Widerstand nachvollzogen und die Funktionsweise für sie somit vorhersehbarer wurde. Während aber für diese Variante ein hoher Nutzen wahrgenommen wurde, ist die Benutzerfreundlichkeit kritisiert worden. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den Befunden von Adell, Várhelyi, et al. (2008) und Meschtscherjakov et al. (2009), die ebenfalls eine nicht zufriedenstellende Benutzerfreundlichkeit dokumentieren. Insbesondere die Funktionsweise des Rekuperationshinweis war in dieser Studie problematisch und sollte optimiert werden, da dieser Hinweis die Energieeffizienz steigerte. Entweder die Präzision muss optimiert werden, oder der Hinweis sollte tendenziell später aktiviert werden, so dass die letzten 20 km/h hydraulisch abgebremst werden müssten. In diesem Geschwindigkeitsbereich ist die Rekuperation ohnehin vernachlässigbar. Außerdem ist zu überlegen, ob statt eines dauerhaften Widerstands nur ein einmaliger Impuls aufgeschaltet werden sollte. Aber auch für die anderen Hinweise sollte die Art des Widerstandaufbaus optimiert werden, um die Akzeptanz zu steigern. Von der Funktionsweise in der Variante A fühlten sich die Fahrer mehrheitlich genervt und gestört und der wahrgenommene Nutzen war gering. Die stärkere Fahrerbeanspruchung im Vergleich zur Baselinefahrt kann vermutlich dadurch erklärt werden.

Die Ergebnisse zur wahrgenommenen Belastung und Beanspruchung mit beiden Varianten des aktiven Beschleunigungspedals sowie die teils widersprüchlichen Ergebnisse in der Literatur diesbezüglich (Adell & Várhelyi, 2008; Birrell et al., 2013; Lange et al., 2008; Seto et al., 2008) lassen sich wahrscheinlich durch die unterschiedlichen Parametrisierungen und Funktionsweisen des aktiven Beschleunigungspedals erklären. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit weiterführender Studien, in denen die Beanspruchung abhängig von der Parametrisierung untersucht wird. Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Studie wird aber empfohlen, Widerstände nicht basierend auf angefordertem Drehmoment und Leistung, sondern abhängig von Beschleunigungswerten und Situationsparametern zu aktivieren, da erstere für den Fahrer schwer verständlich und störend sind. Je besser die Funktionsweise verstanden wird, desto eher kann ein Fahrer versuchen Widerstände proaktiv zu vermeiden und „selbstständig“ energieeffizient fahren.

Abschließend kann Folgendes zusammengefasst werden: Mit dem verbesserten Limitierungsansatzes ist sowohl ein energieeffizientes Fahrverhalten, als auch eine

zufriedenstellende Akzeptanz erreicht worden und zudem waren die Belastung und Beanspruchung gering. Das Beschleunigungsverhalten ist hierbei gleichermaßen mit Hilfe des Limitierungsansatzes und des aktiven Beschleunigungspedals optimiert worden. Der Limitierungsansatz ist für diesen Eco-Driving-Bereich aus Akzeptanzgründen zu bevorzugen. Das Geschwindigkeits- und Rekuperationsverhalten ist mit Hilfe des aktiven Beschleunigungspedals optimiert worden. Um eine zufriedenstellende Akzeptanz zu erreichen, muss aber die Benutzerfreundlichkeit optimiert, die Funktionsweise der Hinweise verbessert (insbesondere die des Rekuperationshinweises) und die Möglichkeit individuelle Einstellungen vorzunehmen, gegeben werden. Aufgrund der Ergebnisse wird erwartet, dass eine Kombination der Ansätze die Energieeffizienz am effektivsten steigern könnte. Inwiefern der Limitierungsansatz durch ein aktives Beschleunigungspedal erweiterbar ist, ohne sich negativ auf die Fahrerbeanspruchung und Akzeptanz auszuwirken, sollte in weiterführenden Studien evaluiert werden.

4 ABSCHLIEBENDE DISKUSSION

Die Reichweite von Elektrofahrzeugen ist im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren stark begrenzt und somit ein ausschlaggebender Grund dafür, warum die Verbreitung von Elektrofahrzeugen auf deutschen Straßen nur schleppend voranschreitet. In der vorliegenden Arbeit untersuchte ich bisher in der wissenschaftlichen Literatur nur unzureichend berücksichtigte Möglichkeiten zur Steigerung der Reichweite: die Anpassung von Pedal- und Motorkennlinien. Auf diese Weise sollen verschiedene Eco-Driving kennzeichnenden Fahrverhaltensweisen gefördert werden (energieeffizientes Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Geschwindigkeitsverhalten, vorausschauendes Fahren). Bei den genannten Anpassungen handelt es sich um ein kombiniertes Fahrbremspedals, die Limitierung von Drehmoment und Leistung sowie der Einsatz eines aktiven Beschleunigungspedals. Das Ziel war es zu untersuchen, welcher Ansatz sich zur Förderung welches Eco-Driving Aspektes am besten eignet, wenn die Steigerung der Energieeffizienz und eine zufriedenstellende Akzeptanz das Ziel sind. Darüber hinaus war ein weiteres Ziel, Gestaltungsempfehlungen für die unterschiedlichen Ansätze abzuleiten. Hierzu ist eine Experimentenreihe bestehend aus vier Probandenstudien im bewegten Fahrsimulator durchgeführt worden, deren Versuchsanordnung und Forschungsfragen im Folgenden kurz zusammengefasst werden. Im Anschluss wird jeder Ansatz basierend auf den Studienergebnissen dahingehend diskutiert, welchen Aspekt von Eco-Driving er in besonderer Weise, effektiv wie akzeptabel unterstützt und daher zur Förderung eben jener Fahrverhaltensaspekte zu bevorzugen ist. Weiterhin leite ich ab, wie die jeweilige Maßnahme optimaler Weise zu gestalten ist. Im zweiten Teil der Diskussion befasse ich mich mit Anwendungsmöglichkeiten, Einschränkungen und weiterem Forschungsbedarf.

4.1 KURZZUSAMMENFASSUNG DER STUDIEN

Alle Studien wurden im bewegten Fahrsimulator in einem abhängigen Design unter Verwendung einer repräsentativen Teststrecke durchgeführt. In Studie I habe ich evaluiert, ob eine kombinierte Fahrbremspedallösung, mit der es möglich war mit dem Beschleunigungspedal zu rekuperieren, im Gegensatz zu einer Zwei-Pedallösung, mit welcher Rekuperation nur durch Betätigung des Bremspedals erfolge, das Verzögerungsverhalten wirksam und akzeptabel zu optimieren. In Studie II überprüfte ich, wie stark mit einem kombinierten Fahrbremspedal maximal rekuperiert werden sollte, um maximale Effekte hinsichtlich Energieeffizienz und Akzeptanz zu erzielen. Evaluiert wurden drei verschiedene Rekuperationsstärken. In Studie III untersuchte ich, welcher Limitierungsansatz (Limitierung des maximalen Drehmoments vs. Limitierung der maximalen Leistung) mit welcher Limitierungsstärke (je zwei Stufen) am geeignetsten dazu ist, den Fahrer dabei zu unterstützen, energieeffizient zu beschleunigen und ob der Limitierungsansatz auch weitere Eco-Driving-Aspekte positiv beeinflussen kann. Basierend auf den Ergebnissen und Gestaltungsempfehlungen der dritten Studie habe ich in Studie IV einen optimierten Limitierungsansatz erarbeitet und evaluiert. Hierzu habe ich ein aktives Beschleunigungspedal mit zwei verschiedenen Parametrisierungen implementiert. Der optimierte Limitierungsansatz wurde mit beiden Auslegungen des aktiven Beschleunigungspedals verglichen und es wurde untersucht, welcher Ansatz hinsichtlich der Akzeptanz und Effizienzsteigerung zu bevorzugen ist.

4.2 ZUSAMMENFASSUNG UND GESTALTUNGSEMPFEHLUNGEN

4.2.1 Beschleunigungsverhalten

Eines der wichtigsten Ziele von Eco-Driving ist es, starkes und unnötiges Beschleunigungsverhalten zu vermeiden. Während ein kombiniertes Fahrbremspedal zwar in geringem Maße zu diesem Effekt beitragen konnte, waren die Limitierung von maximalem Drehmoment und maximaler Leistung diesbezüglich am effektivsten. Durch die Limitierung des maximalen Drehmoments wurden Beschleunigungen im geringen Geschwindigkeitsbereich, durch die Limitierung der Leistung Beschleunigungen in höheren Geschwindigkeitsbereichen reduziert. Die Limitierung darf allerdings nicht zu stark sein und sollte Beschleunigungen von mindestens 2.0 m/s^2 zulassen, um einen Trade-off von Effizienzsteigerung und Akzeptanz zu vermeiden. Besonders die Limitierung der Leistung kann, wenn sie zu stark gewählt ist, zu einer Einschränkung der maximalen Geschwindigkeit führen, die vor allem außerorts von den Fahrern als inakzeptabel bewertet wurde. Generell wird die Verwendung eines Kick-Downs in Verbindung mit einem Limitierungsansatz dringend empfohlen, um auf der einen Seite eine hohe Akzeptanz zu gewährleisten und auf der anderen Seite sicheres Fahren zu ermöglichen, sowohl in hohen Geschwindigkeitsbereichen (beispielsweise beim Überholen) als auch in niedrigen (beispielsweise beim Überqueren einer stark befahrenen Kreuzung). Der Kick-Down sollte hierbei mit einem Widerstand, wie es auch bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe üblich ist, gekennzeichnet sein, um nicht aus Versehen übertreten zu werden. Ist die Limitierung nicht zu stark, wird der Kick-Down auch nicht oft genutzt, sodass Akzeptanz und Energiebilanz zufriedenstellend sind.

Gleichermaßen wirksam zur Beeinflussung des Beschleunigungsverhaltens ist das Aktivieren von Widerständen auf dem Beschleunigungspedal. Allerdings sollte hierbei der Algorithmus nicht an Drehmoment oder Leistung, sondern an einen absoluten Beschleunigungswert gekoppelt werden. Letzteres wird stärker akzeptieren, weil der Grund für einen aktiven Widerstand besser nachvollzogen werden kann (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.6 „Kognitive Beanspruchung“). Möglicherweise könnte eine zusätzliche visuelle Anzeige, die den Grund des Widerstandes erläutert, die Akzeptanz steigern. Hierbei sollte allerdings abgewägt werden, ob die zusätzliche visuelle Ablenkung akzeptabel ist. Darüber hinaus ist ein stetig ansteigender Widerstand, beginnend bei einem kaum merklichen Eingriff, empfehlenswerter als ein sich sprunghaft aufbauender Widerstand, wie er in der vorliegenden Arbeit implementiert war. Letztere Variante war zu aufdringlich und wurde daher als störend bewertet. Diesbezüglich stehen die Ergebnisse der vierten Studie in Gegensatz zu den Befunden von Jamson et al. (2013), in dessen Studie die Fahrer einen sprunghaften Anstieg des Widerstandes zur Förderung eines effizienten Beschleunigungsverhaltens bevorzugten. Allerdings sind generell für die Parametrisierung eines aktiven Beschleunigungspedals intensive Vortests mit einer breiten Stichprobe empfehlenswert, denn schon kleine Veränderungen der Parametrisierung können große Akzeptanzunterschiede bewirken, wie der Vergleich von Jamson et al. (2013) und der vierten Studie zeigt. Auch sollte in den Algorithmus integriert werden, dass sich der Widerstand in bestimmten Situationen deaktiviert, selbst wenn nach Eco-Driving-Maßstäben zu stark beschleunigt wird. Auf diese Weise könnte verhindert werden, dass Fahrer das Gefühl haben, in Situationen wie Überholmanövern oder beim Überqueren von

stark befahrenen Kreuzungsbereichen gegen das System anzukämpfen, und dadurch weniger zufrieden aber auch stärker beansprucht zu sein. Denkbar wäre beispielsweise dass der Widerstand erlischt, wenn ihm der Fahrer für einen definierten Zeitraum nicht nachgibt.

Aufgrund der vielen Stellschrauben eines aktiven Beschleunigungspedals, die mit größter Sorgfalt abgestimmt werden müssen, um eine hohe Akzeptanz und Benutzerfreundlichkeit zu gewährleisten, empfehle ich daher, das Beschleunigungsverhalten durch Limitierung von Drehmoment und Leistung statt durch das Aufschalten von Widerständen zu beeinflussen, auch wenn ebenfalls für diese Maßnahme ein gewisser Aufwand zur optimalen Abstimmung von Akzeptanz und Energieeffizienz nötig ist. Das aktive Beschleunigungspedal sollte stattdessen zur Optimierung des Verzögerungs- und Geschwindigkeitsverhaltens eingesetzt werden.

4.2.2 Verzögerungsverhalten

Rekuperatives Bremsen ist hydraulischem Bremsen aus energetischen Gründen vorzuziehen. Die Förderung dieses Fahrverhaltens gelang am effektivsten, wenn die Rekuperation durch das Lösen des Beschleunigungspedals bewirkt wurde, im Gegensatz zu einer Pedallösung, bei der mit dem Bremspedal rekuperiert wurde. Erstere Variante erfuhr darüber hinaus eine hohe Akzeptanz und ist daher im Vergleich zu letzterer zu bevorzugen und zu empfehlen. Die Rekuperation sollte mittelstarke bis starke Verzögerungen zulassen (d.h. $1.7 - 2.1 \text{ m/s}^2$). Mit diesen Verzögerungen können die meisten Verkehrssituationen ohne Hinzunahme der hydraulischen Bremse gemeistert und darüber hinaus die Menge an rekuperierter Energie gesteigert werden. Ersteres trägt zu einer hohen Akzeptanz bei, letzteres zu einer günstigen Energiebilanz und gesteigerter Reichweite. Je stärker die rekuperative Bremse allerdings eingestellt war, desto stärker waren die mittleren Beschleunigungen. Die Studienergebnisse deuten darauf hin, dass eine starke Rekuperation gleichmäßiges Fahren negativ beeinflusst. Allerdings überwiegen die Vorteile einer starken Rekuperation die Nachteile, weswegen starke Rekuperationen empfohlen werden und im Gegensatz zu schwachen Rekuperationen ($< 1.0 \text{ m/s}^2$) zu bevorzugen sind.

Das Verzögerungsverhalten kann ferner durch haptische Hinweise optimiert werden, die einen energieoptimalen Zeitpunkt zum Rekuperieren anzeigen, wenn sich der Fahrer beispielsweise einer Kreuzung annähert. Auf diese Weise kann durch eine gesteigerte Menge an rekuperierter Energie die Energiebilanz begünstigt werden, wenngleich dieser Hinweis, sofern er nicht hochpräzise funktioniert, nur eine geringe Akzeptanz erfährt (siehe hierzu Kapitel 4.2.4 „Vorausschauendes Fahren“).

4.2.3 Einhalten von Geschwindigkeitsbegrenzungen

Ein weiterer wichtiger Aspekt von Eco-Driving ist das Einhalten von Geschwindigkeitsbegrenzungen. Der Grund hierfür ist, dass mit steigender Geschwindigkeit auch der Energieverbrauch ansteigt. Kleinere Effekte auf die mittlere Geschwindigkeit zeigte das kombinierte Fahrpedal, aber wiederum waren die Limitierung von Drehmoment und Leistung am effektivsten. Mit diesen beiden Maßnahmen wurde die mittlere gefahrene Geschwindigkeit am stärksten reduziert. Zu empfehlen sind diese allerdings nicht, wenn beabsichtigt werden soll, das

Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer im eigentlichen Sinn zu beeinflussen. Mit den jeweiligen Limitierungen war es den Fahrern generell nicht möglich, stark zu beschleunigen. Dieser Umstand wirkte sich auf die gefahrene mittlere Geschwindigkeit im Allgemeinen aus. Einfluss auf das Überschreiten von Höchstgeschwindigkeiten können diese Maßnahmen also nur indirekt nehmen.

Stattdessen sollte hierzu ein aktives Beschleunigungspedal gewählt werden, da es die Fahrer situationsspezifisch auf Geschwindigkeitsüberschreitungen aufmerksam macht statt durchweg geringere mittlere Geschwindigkeiten aufgrund geringerer möglicher Beschleunigungen zuzulassen. Unter der Voraussetzung, dass Fahrer die Grenzwerte, ab denen ein solches System greift, individuell bestimmen können und es eine Möglichkeit gibt, das System zu deaktivieren, wenn der Fahrer ganz bewusst die Geschwindigkeit überschreitet, ist das aktive Beschleunigungspedal zur Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeiten bzw. zur Einhaltung von Geschwindigkeitsbegrenzungen klar zu empfehlen. Darüber hinaus stellt das Einhalten der erlaubten Geschwindigkeitsbegrenzungen einen wichtigen Sicherheitsaspekt dar.

4.2.4 Vorausschauendes Fahren

Durch vorausschauendes Fahren soll unnötiges Beschleunigen und Bremsen vermieden werden. Allgemein soll dadurch das Fahrverhalten weniger extrem bzw. gleichmäßiger werden. Systeme, die ein vorausschauendes Fahrverhalten aktiv fördern, sind beispielsweise Ampelphasenassistenten, denn mit deren Hilfe kann ein Fahrer beurteilen, ob es sich noch lohnen würde zu beschleunigen, bzw. welche Geschwindigkeit er einhalten sollte, um in einer grünen Welle zu fahren. Ein solches System hilft also dem Fahrer durch eine bereitgestellte Vorausschau gleichmäßig zu fahren. Alle untersuchten Ansätze trugen zu einem weniger extremen Fahrverhalten bei: Es wurde schwächer beschleunigt, schwächer verzögert, teilweise nahm die Varianz der Geschwindigkeit ab. Die Analyse der Fahrverhaltensparameter zeigt also, dass ein Fahrverhalten gefördert werden konnte, welches durch vorausschauendes Fahren erreicht werden soll. Allerdings konnte nur mit einer Maßnahme, und zwar mit dem aktiven Beschleunigungspedal, vorausschauendes Fahren im eigentlichen Sinne aktiv unterstützt werden. Insbesondere mit der Funktion zur Förderung einer (energie-) optimalen Rekuperation war es den Fahrern möglich, genau das richtige Maß an Verzögerung durch Rekuperation anzuwenden, um an einer Kreuzung stehen zu bleiben oder die Geschwindigkeit wegen einer Geschwindigkeitsbeschränkung zu verringern.

So effektiv diese Funktion rein objektiv den Verbrauch reduzieren konnte, so sehr wurde sie von den Fahrern abgelehnt. Insbesondere bei einem aktiven Beschleunigungspedal scheinen kleine Funktionsfehler oder Ungereimtheiten viel weniger verziehen zu werden, als es möglicherweise bei einem vergleichbaren visuellen Assistenten der Fall wäre. Zudem scheinen die Schwellen, innerhalb derer ein Widerstand auf dem Pedal wahrgenommen und als störend bewertet wird, sehr eng definiert zu sein. Zur Steigerung der Akzeptanz muss die Parametrisierung der Funktion daher optimiert werden. Der Zeitpunkt, an dem das Fahrzeug zum Stehen kommt, muss unmittelbar am Kreuzungsbereich stattfinden oder es muss festgelegt werden, dass der Hinweis später kommt. Dann müsste der Fahrer die letzten 20-30 km/h hydraulisch abbremsen, um ein zu langes und langsames „Anrollen“ an

Kreuzungen zu vermeiden. Weiterhin muss ebenfalls die Benutzerfreundlichkeit optimiert werden. So sollte ein durchgehender Widerstand als Hinweis vermieden werden. Möglichweise könnte hier ein kurzer und sanfter Impuls auf dem Pedal gleichermaßen den optimalen Rekuperationspunkt markieren. In keinem Fall darf aber ein Widerstand aktiv sein, wenn der Fahrer anschließend wieder beschleunigen möchte. Unter Berücksichtigung der genannten Optimierungsmaßnahmen ist ein aktives Beschleunigungspedal zur Unterstützung von vorausschauendem Fahren als effektiv und akzeptabel zu bewerten.

Vorausschauendes Fahren kann auch durch Segeln erreicht werden, da es ebenfalls zu einem gleichmäßigen Fahren beitragen kann. Im Allgemeinen führt ein kombiniertes Fahrbremspedal dazu, dass der Segelzustand nur erschwert hergestellt werden kann, im Vergleich zu einer konventionellen Pedallösung. Keine der Maßnahmen trug zur signifikanten Steigerung des Segelverhaltens bei. Inwiefern allerdings Segeln einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch hat, konnte in keiner der Studien geklärt werden. Dies sollte in weiterführenden Studien Beachtung finden.

4.2.5 Einfluss des Fahrertyps

Die Ergebnisse zeigen, dass von allen untersuchten Maßnahmen sowohl effiziente als auch ineffiziente Fahrer profitierten und alle Fahrer ihren Verbrauch signifikant reduzieren konnten. Meist verbrauchten effiziente Fahrer in allen Bedingungen weniger als ineffiziente Fahrer. Es konnte keine negative Interaktion eines bestimmten Fahrstils und einer bestimmten Kennlinie gefunden werden. Die Ergebnisse der Studien III und IV zeigen allerdings, dass obwohl auch der ineffizienteste Fahrer von der wirksamsten Kennlinie profitiert, sein Verbrauch immer noch stark vom effizientesten Fahrer abwich. Zwischen den beiden Extrema lagen zum Teil 30 % Unterschied. Vor allem also verhältnismäßig ineffizienten Fahrern muss mit weiteren Maßnahmen begegnet werden, wenn deren Energieverbrauch stärker reduziert werden soll. Insbesondere diese Fahrer könnten durch den Einsatz von Eco-Feedback-Assistenten, die zum einen die Reichweitensteigerung oder Kosteneinsparung verdeutlichen oder über Gamification-Ansätze motivieren, profitieren. Synergieeffekte der untersuchten Maßnahmen mit Eco-Feedback und Gamification für besonders ineffiziente Fahrer stellen daher einen interessanten Ansatzpunkt für weiterführende Forschung dar.

4.2.6 Kognitive Beanspruchung

Die Veränderung von Pedal- und Motorkennlinien hatte Auswirkungen auf die wahrgenommene Belastung und Beanspruchung. Die Limitierung von Leistung und Drehmoment führte hierbei zu einer geringeren wahrgenommenen Belastung und Beanspruchung als bei einer Fahrt ohne Limitierung. Möglicherweise war das durch die Limitierung bedingte gleichmäßigere Fahrzeug- und Fahrverhalten derart angenehm, dass das Fahren als weniger anstrengend empfunden wurde. Für das aktive Beschleunigungspedal sind die Ergebnisse augenscheinlich widersprüchlich. Mit einer Variante des aktiven Beschleunigungspedals wurden im Vergleich zu einer nicht assistierten Fahrt die Belastung und Beanspruchung höher wahrgenommen; die andere Variante hatte keinen Einfluss auf die wahrgenommene Belastung und Beanspruchung. Erstere Variante, die in Abhängigkeit von angefordertem Drehmoment und Leistung Widerstände aktivierte, war laut Fahrern wenig vorhersehbar, sodass an diesen

inkonsistenten Zusammenhang von Pedalstellung und -gegenkraft nicht adaptiert werden konnte und die Widerstände daher nicht vermieden werden konnten. Letztere Variante des aktiven Beschleunigungspedals, die abhängig von Beschleunigungsgrenzwerten und Situationsparametern Widerstände aktivierte, war laut Fahrern verständlicher und vorhersehbarer. Insgesamt ist die erweiterte, situationsparameterabhängige Variante daher auch als benutzerfreundlicher bewertet worden als die rein fahrzeugparameterabhängige.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit legen den Schluss nahe, dass die kognitive Beanspruchung umso geringer ist, je benutzerfreundlicher die Widerstände aktiviert werden und je müheloser an diese adaptiert werden kann. Die Benutzerfreundlichkeit kann hierbei durch eine bessere Nachvollziehbarkeit und Vorhersehbarkeit der aktivierten Widerstände gesteigert werden, sodass diese einfacher vermieden werden können. Die Möglichkeit, die Bedingungen und Grenzwerte für das Aktivieren eines Widerstandes individuell einzustellen, könnten hierzu beitragen. Weiterhin könnten visuelle Anzeigen, die den Grund für einen aktiven Widerstand erklären, ebenfalls dabei helfen, die Hinweise des aktiven Beschleunigungspedals verständlicher zu gestalten. Die Ergebnisse von Jagiellowicz-Kaufmann, Hammer, Hanig und Schmitz (2015) zeigen, dass Eco-Driving Hinweise, die visuell, haptisch oder als visuell-haptische Kombination präsentiert werden, den Verbrauch vergleichbar wirksam reduzierten. Azzi et al. (2011) konnten zeigen, dass eine Kombination aus visuellen und haptischen Hinweisen effektiver war als nur visuell oder nur haptisch dargebotene Eco-Driving-Hinweise. Weiterführende Studien sollten hierbei untersuchen, ob eine Kombination aus beiden Varianten die visuelle Ablenkung und kognitive Beanspruchung mindert oder verstärkt.

4.3 AUSBLICK

4.3.1 Anwendungsmöglichkeiten

Die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zur energieeffizientesten Position und Stärke der Rekuperationsfunktion können direkt in die Produktion von Elektrofahrzeugen der neuen Generation implementiert werden. Gleiches gilt für einen Eco-Modus, der die Leistung und das Drehmoment limitiert. Da es sich bei beiden Maßnahmen um Veränderungen handelt, die keine Manipulation von Hardware sondern von Software erfordern, sind die Entwicklungskosten als verhältnismäßig gering zu bewerten. Wie allerdings schon weiter oben diskutiert, bedarf es für jeden Fahrzeugtyp beziehungsweise für jede Fahrzeugklasse einer eigenständigen Parametrisierung der jeweiligen Limitierungsstärken.

Das aktive Beschleunigungspedal ist, basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, zur Förderung eines energieeffizienten Geschwindigkeits- und Rekuperationsverhaltens zu empfehlen und weniger zur Förderung eines energieeffizienten Beschleunigungsverhaltens – insbesondere, wenn ein Eco-Modus (basierend auf dem Limitierungsansatz) verfügbar ist. Die Technologie eines aktiven Beschleunigungspedals und die Möglichkeiten, dieses zu programmieren, sind fortgeschritten. Vor diesem Hintergrund ist die Anwendung dieser Maßnahme, Hardware-Kosten unberücksichtigt, zu empfehlen. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass Informationen über aktuelle und bevorstehende Geschwindigkeitsbegrenzungen verfügbar sein müssen, damit eben jene Aufgaben des aktiven Beschleunigungspedals funktionieren können. Diese Informationen

können über kooperative Kommunikationstechnologien, wie Car-to-Car oder Car-to-X-Wege, über GPS und Navigationsgeräte oder über spezielle Verkehrsschilder-Scanner-Assistenten bereitgestellt werden. Diese Systeme müssen allerdings bereits implementiert und eine Informationsschnittstelle muss bereitgestellt sein. Daher ist eine zeitnahe Einbindung eines aktiven Beschleunigungspedals mit den oben beschriebenen Funktionen mit zufriedenstellender Qualität nur bedingt zeitnah und für alle Fahrzeugklassen von Elektrofahrzeugen zu erwarten, nicht zuletzt wegen der zusätzlichen Kosten, die für genannten Systeme für den Käufer eines Elektrofahrzeuges anfallen würden.

4.3.2 Einschränkungen und weiterer Forschungsbedarf

Die vorliegenden Ergebnisse basieren zwar auf einem validierten Elektroautomodell, können aber nur relativ auf reale Bedingungen übertragen werden. Die simulierten Elektromotoren sind in Relation zur Größe des simulierten Fahrzeuges sehr stark. Daher lassen sich keine absoluten Werte auf Realfahrzeuge übertragen, insbesondere bezüglich der Limitierung von Drehmoment und Leistung. Letztlich sollten alle Optimierungsmaßnahmen in Realfahrversuchen getestet werden, um das absolute Ausmaß der Energieeffizienzsteigerung sowie die Langfristigkeit der optimierten energieeffizienten Fahrweise zu verifizieren, aber auch um die Parameter der jeweiligen Maßnahme korrekt zu wählen. Sicherlich wäre dazu die Implementierung in Privatfahrzeuge sinnvoll, die bis auf das aktive Beschleunigungspedal auf Softwareständen basiert und die Implementierungskosten daher überschaubar sein sollten. Dass allerdings auch die Einbindung eines aktiven Beschleunigungspedals in eine beachtliche Zahl an Realfahrzeugen zu Untersuchungszwecken umsetzbar ist, zeigen die Studien von Adell (2007) und Adell und Várhelyi (2008). Eine langfristig angelegte Realfahrstudie hätte darüber hinaus den Vorteil, dass die Ergebnisse auch mit einer Stichprobe bestehend aus (zunehmend) erfahrenen Elektrofahrzeug-Fahrern validiert werden könnten, anders als es die Probanden der vier Studien der vorliegenden Arbeit waren. Möglicherweise sind für erfahrene Fahrer von Elektrofahrzeugen die Effekte geringer.

Des Weiteren sollen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit als Ausgangspunkt für weiterführende Forschung im interdisziplinären Bereich der Verkehrspsychologie dienen und einen Beitrag zu einem integrierten Ansatz leisten, in dem Eco-Feedback-Assistenten, komponenten-, fahrer- und fahrzeugbasierte Maßnahmen zusammenwirken. Mit Hilfe des aktiven Beschleunigungspedals konnte im Mittel 13.9 % und mit einem optimierten Limitierungsansatz 12 % eingespart werden. Diese Effekte sind bezüglich der Größenordnung vergleichbar mit langfristigen Effekten, die mit Eco-Feedbackassistenten erzielt werden (Barkenbus, 2010; Klunder et al., 2009). Inwiefern das Energieeinsparpotential durch Eco-Driving, welches bis zu 26.8 % betragen kann (Helmbrecht et al., 2014), synergetisch mit Eco-Trainings und visuellen Eco-Assistenten weiter ausgeschöpft wird, sollten weiterführende Studien untersuchen.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- ADAC e.V. (2013). Sparen beim Fahren. Zugriff am 27.11.2013, unter <http://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/spritsparen/sparen-beim-fahren-antwort-1.aspx>
- ADAC e.V. (2016). Sparen beim Fahren – ADAC Spritspartraining hilft beim Sprit sparen. Zugriff am 27.11.2013, unter <https://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/spritsparen/sparen-beim-fahren-antwort-2.aspx>
- Adell, E. (2007). Drivers' evaluations of the active accelerator pedal in a real-life trial. *IATSS research*, 31(1), 89-99.
- Adell, E., & Várhelyi, A. (2008). Driver comprehension and acceptance of the active accelerator pedal after long-term use. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 11(1), 37-51.
- Adell, E., Várhelyi, A., Alonso, M., & Plaza, J. (2008). Developing human-machine interaction components for a driver assistance system for safe speed and safe distance. *IET Intelligent Transport Systems*, 2(1), 1-14.
- Adell, E., Várhelyi, A., & Hjalmdahl, M. (2008). Auditory and haptic systems for in-car speed management – A comparative real life study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 11(6), 445-458.
- Azzi, S., Reymond, G., Mérienne, F., & Kemeny, A. (2011). Eco-driving performance assessment with in-car visual and haptic feedback assistance. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11(4), 181-190.
- Barkenbus, J. N. (2010). Eco-driving: An overlooked climate change initiative. *Energy Policy*, 38(2), 762-769.
- Berthold, N. (2011). Durchbruch und Energiewende. Merkels Traum von einer Million Elektroautos. Zugriff am 27.03.2014, unter <http://www.rp-online.de/leben/auto/news/merkels-traum-von-einer-million-elektroautos-aid-1.1229973>
- Birrell, S. A., Young, M. S., & Weldon, A. M. (2013). Vibrotactile pedals: provision of haptic feedback to support economical driving. *Ergonomics*, 56(2), 282-292.
- Bock, O. (2001). Mechanismen der sensomotorischen Adaptation beim Menschen. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 52(12), 338-342.
- Brundell-Freij, K., & Ericsson, E. (2005). Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns. *Transportation research part D: transport and environment*, 10(3), 213-229.
- Bundesregierung. (2009). *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität*. Berlin: Verfügbar unter <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/nationaler-entwicklungsplan-elektromobilitaet-derbundesregierung>.
- Chéron, E., & Zins, M. (1997). Electric vehicle purchasing intentions: The concern over battery charge duration. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 31(3), 235-243.
- Clarke, P., Muneer, T., & Cullinane, K. (2010). Cutting vehicle emissions with regenerative braking. *Transportation research part D: transport and environment*, 15(3), 160-167.

- Cocron, P. (2014). *Regenerative braking and low vehicle noise of electric vehicles—implications for the driver*. Unveröffentlichte Dissertation, Technische Universität 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*, *65*(8), 1203-1215.
- Cousineau, D. (2005). Confidence intervals in within-subject designs: A simpler solution to Loftus and Masson's method. *Tutorial in Quantitative Methods for Psychology*, *1*(1), 4-45.
- Davis, F. (1985). *A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems - theory and results*. Unveröffentlichte Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- de Rosario, H., Louredo, M., Díaz, I., Soler, A., Gil, J. J., Solaz, J. S., & Jornet, J. (2010). Efficacy and feeling of a vibrotactile Frontal Collision Warning implemented in a haptic pedal. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *13*(2), 80-91.
- Diekmann, K., & Santen, O. (2008). Die Zukunft gehört dem Elektroauto. Verfügbar unter Autobild.de website: <http://www.autobild.de/artikel/vw-chef-martin-winterkorn-im-interview-720501.html>
- Donges, E. (1982). Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, *27*(2), 183-190.
- Dorrer, C. (2004). *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen* (Vol. 24). Renningen: Expert Verlag.
- Eberl, T. X. (2014). *Charakterisierung und Gestaltung des Fahr-Erlebens der Längsführung von Elektrofahrzeugen*. Unveröffentlichte Dissertation, Technische Universität München.
- eFuture. (2013). eFuture - efficient mobility. Zugriff am 06.04.2013, unter <http://www.efuture-eu.org/about/project-summary/>
- 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.
- Flanagan, J. R., Nakano, E., Imamizu, H., Osu, R., Yoshioka, T., & Kawato, M. (1999). Composition and decomposition of internal models in motor learning under altered kinematic and dynamic environments. *Journal of Neuroscience*, *19*, RC34 (31-35).
- Franke, T., Neumann, I., Bühler, F., Cocron, P., & Krems, J. F. (2012). Experiencing range in an electric vehicle: understanding psychological barriers. *Applied Psychology*, *61*(3), 368-391.
- Franklin, D. W., Osu, R., Burdet, E., Kawato, M., & Milner, T. E. (2003). Adaptation to Stable and Unstable Dynamics Achieved By Combined Impedance Control and Inverse Dynamics Model. *Journal of Neurophysiology*, *90*(5), 3270-3282.
- Gstalter, H. (2000). Verkehrspsychologie. In G. Wenninger (Hrsg.), *Lexikon der Psychologie*. Heidelberg: Spektrum Verlag. Verfügbar unter <http://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/verkehrspsychologie/16296>.

- Gunnesch-Luca, G. (2016). Technologieakzeptanzmodell, Technology Acceptance Model. In M. A. Wirtz (Hrsg.), *Dorsch-Lexikon der Psychologie*. Verfügbar unter <https://portal.hogrefe.com/dorsch/technologieakzeptanzmodell-technology-acceptance-model/>.
- Hart, S. G. (2006). *NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later*. Vortrag auf der 50th annual meeting of the human factors and ergonomics society, San Francisco, California.
- Heller, O. (1985). Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung. *Psychologische Beiträge*, 27, 478-493.
- Helmbrecht, M., Bengler, K., & Vilimek, R. (2014). Strategies for Efficient Driving with Electric Vehicles. *Grundlagen und Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion*, 83.
- Heuer, H., & Jäncke, L. (2006). Psychomotorik. In H. Spada (Hrsg.), *Lehrbuch Allgemeine Psychologie* (3. neubearbeitete Aufl.). Bern: Huber.
- Hjälmdahl, M., & Várhelyi, A. (2004). Speed regulation by in-car active accelerator pedal: Effects on driver behaviour. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7(2), 77-94.
- Hoffmann, S., & Buld, S. (2006). Driving in a simulator. Design and evaluation of a training programme. *VDI Berichte*, 2006(1960), 113-132.
- Hondaoldies. (k.A.). ACDC. Zugriff am 23.04.2015, unter <http://www.hondaoldies.de/Korbmacher-Archiv/Technik/acdc.htm>
- Jagiellowicz-Kaufmann, M., Hammer, T., Hanig, M., & Schmitz, M. (2015). Evaluation of a multi-modal driver coaching function for electric vehicles. *Intelligent Transport Systems, IET*, 9(7), 727-733.
- Jagiellowicz, M., Schmitz, M., Maag, C., & Hanig, M. (2012). *The impact of a combined pedal solution on efficient electric driving and drivers' acceptance: A driving simulator study*. Vortrag auf der 54. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP), Mannheim.
- Jamson, H., Hibberd, D. L., & Merat, N. (2013). *The design of haptic gas pedal feedback to support eco-driving*. Vortrag auf der 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design, New York.
- Klauer, S. G., Dingus, T. A., Neale, V. L., Sudweeks, J. D., & Ramsey, D. J. (2006). The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: An analysis using the 100-car naturalistic driving study data *NHTSA Report No. DOT HS 810 594*. Blacksburg, VA: Virginia Tech Transportation Institute.
- Klunder, G., Malone, K., Mak, J., Wilmink, I., Schirokoff, A., Sihvola, N., . . . Roeterdink, W. (2009). Impact of information and communication technologies on energy efficiency in road transport-Final Report. Delft: TNO.
- König, W., Weiß, K.-E., & Mayser, C. (2002). S.A.N.T.O.S Unveröffentlicher gemeinsamer Projektabschlussbericht der Robert Bosch GmbH und der BMW Group.
- Konz, S., Wadhera, N., Sathaye, S., & Chawla, S. (1971). Human Factors Considerations for a Combined Brake-Accelerator Pedal. *Ergonomics*, 14(2), 279-292.

- Krakauer, J. W., Ghilardi, M.-F., & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nature neuroscience*, 2(11), 1026-1031.
- Kremser, A. (2007). *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Motoren und Anwendungen* (4. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg+ Teubner.
- Kuhler, M., & Karstens, D. (1978). Improved driving cycle for testing automotive exhaust emissions. *SAE Technical Paper, No. 780650*.
- Lai, E., Hodgson, A., & Milner, T. (2003). Influence of interaction force levels on degree of motor adaptation in a stable dynamic force field. *Experimental brain research*, 153(1), 76-83.
- Lange, C., Bubb, H., Tönnis, M., Klinker, G., Ergonomie, F., & Ökologie, F. (2008). *Sicherheitspotential und Verbrauchsreduzierung durch ein intelligent geregeltes aktives Gaspedal*. Vortrag auf der 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, München.
- Lebeau, K., Van Mierlo, J., Lebeau, P., Mairesse, O., & Macharis, C. (2013). Consumer attitudes towards battery electric vehicles: a large-scale survey. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 5(1), 28-41.
- Meschtscherjakov, A., Wilfinger, D., Scherndl, T., & Tscheligi, M. (2009). *Acceptance of future persuasive in-car interfaces towards a more economic driving behaviour*. Vortrag auf der AutomotiveUI 2009, Essen, Germany.
- 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* (pp. 485–520). New York: Plenum Press.
- MINI Media Information. (2008). A new Experience – Driving Pleasure Without Emissions: The MINI E. Verfügbar unter [electromobily.org](http://www.electromobily.org) website: http://www.electromobily.org/w/images/0/0a/MINI_LA_GB.pdf
- Mitsubishi Motors Corporation. (2016). PLUG and LIVE - Advanced, assured, i-MiEV. Zugriff am 18.03.2016, unter http://www.mitsubishi-motors.com/en/showroom/i-miev/plug_and_live/
- Mulder, M. (2007). *Haptic gas pedal feedback for active car-following support*. Unveröffentlichte Dissertation, Technische Universität Delft.
- Nickel, M. (2001). *Geschwindigkeitsabhängige Summenhäufigkeiten von Längs- und Querbeschleunigungen für ein Fahrerkollektiv*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Fachhochschule Köln.
- Nickel, M., & Hugemann, W. (2003). *Längs- und Querbeschleunigungen im Alltagsverkehr*. Vortrag auf der EVU Conference, Zürich.
- Nilsson, R. (2002). Evaluation of a combined brake–accelerator pedal. *Accident Analysis & Prevention*, 34(2), 175-183.
- Nirschl, G., Blum, E. J., & Kopf, M. (1999) Untersuchungen zur Benutzbarkeit und Akzeptanz eines ACC-Fahrerassistenzsystems. *Mitteilungen, Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung - IITB*. Karlsruhe: Fraunhofer IITB.
- Nissan Global. (2008). World first ECO Pedal helps reduce fuel consumption. Zugriff am 24.02.2014, unter http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2008/_STORY/080804-02-e.html

- Oberauer, K., Mayr, U., & Kluwe, R. H. (2006). Gedächtnis und Wissen. In H. Spada (Hrsg.), *Lehrbuch Allgemeine Psychologie*. Bern: Huber.
- OECD/IAE. (2013). CO2 Emission From Fuel Combustion - Highlights. Paris: International Energy Agency.
- Pearre, N. S., Kempton, W., Guensler, R. L., & Elango, V. V. (2011). Electric vehicles: How much range is required for a day's driving? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(6), 1171-1184.
- Poock, G. K., West, A. E., Toben, T. J., & Sullivan, J. P. T. (1973). A Combined Accelerator-Brake Pedal. *Ergonomics*, 16(6), 845-848.
- Radke, T. (2013) Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. Vol. 19. *Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik* Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- 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*(3), 257-266.
- Reichart, R., & Haller, R. (1995). Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr. In W. Fastenmeier (Hrsg.), *Autofahrer und Verkehrssituation* (pp. 199-215). Köln: Verlag TÜV Rheinland.
- Rittger, L. (2011). *Energy Consumption and Acceptance of an Electric Vehicle with Combined Pedal Solution*. Unveröffentlichter Praktikumsbericht zur Verkehrspsychologischen Forschung. Universität Würzburg.
- Rittger, L. (2012). *The Compatibility of Energy Efficiency with Pleasure of Driving in a Fully Electric Vehicle*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Würzburg.
- Robert Bosch GmbH. (2016). Das aktive Gaspedal - Intuitive Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug. Zugriff am 01.03.2016, unter <http://www.bosch-mobility-solutions.de/media/bilder/vernetzte-mobilität/aktives-gaspedal/c-zusammenfassung-aktives-gaspedal.pdf>
- Rose, G., & Symmons, M. (2008). *Testing ecodriving training in Australian conditions*. Vortrag auf der 31st Australasian transport research forum (ATRF), Gold Coast, Queensland, Australia.
- Schmitz, M., Maag, C., Jagiellowicz, M., & Hanig, M. (2013). Impact of a combined accelerator-brake pedal solution on efficient driving. *IET Intelligent Transport Systems*, 7(2), 203-209.
- Schumacher, M. (2001). *Vergleich verschiedener subjektiver Maße der Beanspruchung bei Realfahrten im PKW*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Würzburg
- Seto, Y., Takae, Y., Sugano, T., Sato, R., Kurata, K., & Kobayashi, M. (2008). Development of a distance control assist system with an active accelerator pedal. *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems*, VII8(7).
- Shadmehr, R., & Brashers-Krug, T. (1997). Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *The Journal of Neuroscience*, 17(1), 409-419.
- Shadmehr, R., & Moussavi, Z. M. (2000). Spatial generalization from learning dynamics of reaching movements. *The Journal of Neuroscience*, 20(20), 7807-7815.

- Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience*, *14*(5), 3208-3224.
- Statista. (2015). Anzahl der Personenkraftwagen mit Elektroantrieb in Deutschland nach Bundesländern (Stand: 1. Januar 2015) Zugriff am 03.03.2015, unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/75841/umfrage/bestand-an-personenkraftwagen-mit-elektroantrieb/>
- Thomas, M. (2010). *Mechanismen der sensomotorischen Adaptation unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses sensorischer Informationsquellen*. Unveröffentlichte Dissertation, Deutsche Sporthochschule Köln.
- Tomaszewski, M. (2011). *Identifikation und Vorhersage des Fahrstils über Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten des Fahrers*. Unveröffentlichter Praktikumsbericht. Universität Würzburg.
- Tong, S., & Koller, D. (2002). Support vector machine active learning with applications to text classification. *The Journal of Machine Learning Research*, *2*, 45-66.
- Turrentine, T., Garas, D., Lentz, A., & Woodjack, J. (2011). The US Davis MINI E Consumer Study. Zugriff am 23.09.2013, unter http://pubs.its.ucdavis.edu/download_pdf.php?id=1470
- Van Der Laan, J. D., Heino, A., & De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *5*(1), 1-10.
- Van Mierlo, J., Maggetto, G., Van de Burgwal, E., & Gense, R. (2004). Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *218*(1), 43-50.
- Várhelyi, A., Hjalmdahl, M., Risser, R., Draskóczy, M., Hydén, C., Taniguchi, S., . . . Ashouri, H. (2002). *The effects of large scale use of active accelerator pedal in urban areas*. Vortrag auf der International Cooperation of Theories and Concepts in Traffic safety (ICTCT) Workshop, Nagoya, Japan.
- Vattenfall GmbH. (2011). Ergebnisse des Mini E Feldversuchs. Verfügbar unter [7-forum.com](http://www.7-forum.com) website: http://www.7-forum.com/news/2011/MINI_E_Berlin_Praesentation_31.03.2011.pdf
- Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. *Management science*, *46*(2), 186-204.
- Vollrath, M., Huemer, A. K., Nowak, P., & Pion, O. (2014). *Ablenkung durch Informations- und Kommunikationssysteme (Vol. 26)*. Berlin: Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
- Wallentowitz, H., & Freialdenhoven, A. (2011). *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges. Technologien, Märkte und Implikationen (2 Aufl.)*. Wiesbaden: Vieweg+Teuber.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *50*(3), 449-455.
- Winner, H., Hakuli, S., & Wolf, G. (2009). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

- Wirtz, M. A., & Strohmer, J. (2013). *Dorsch Lexikon der Psychologie*. Bern: Huber.
- Witzani, L. (2014). Nachhaltigkeit durch persuasive Technologie. In T. Stockinger, M. Koelle, P. Lindemann & M. Kranz (Hrsg.), *Prototyping for the Digital City. Advances in Embedded Interactive Systems. Technical Report - Winter 2013/2014*. Pasau, Germany.

6 APPENDIX

6.1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AAP	Active accelerator pedal
AO	Außerorts
AV	Abhängige Variable
ax	Längsbeschleunigung
BAS	Baseline(fahrt)
CPS	Combined pedal solution (Kombinierte Fahrbremspedallösung)
EV	Electric vehicle (Elektroauto)
Geschw.	Geschwindigkeit
HE	Haupteffekt
HB	Hydraulische Bremse
ICEV	Internal combustion engine vehicle (Fahrzeug mit internem Verbrennungsmotor)
IO	Innerorts
kW	Kilowatt
LIM	Limitierungsansatz
LS	Landstraße
M	Mittelwert
Nm	Newtonmeter
N	Anzahl
RB	Rekuperative Bremse
SD	Standardabweichung
SLK	Scharfe Linkskurve
SPS	Split pedal solution (getrennte Zwei-Pedallösung)
SRK	Scharfe Rechtskurve
UV	Unabhängige Variable
WIVW	Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften
WLK	Weite Linkskurve
WRK	Weite Rechtskurve
v	Geschwindigkeit

6.2 DIE TESTSTRECKEN

6.2.1 Studie II: Die Stärke der rekuperativen Bremse

Tabelle 19: Chronologischer Überblick der Teststrecke in Studie II.

Situation	Geschwindigkeitslimit	Länge	Kurzbezeichnung
Start, Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO101
SRK1 (r=70)	70 km/h	150 m	SRK1
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO102
WLK (r=200m)	100 km/h	150 m	WLK1
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO103
SLK (r=70)	70 km/h	150 m	SLK1
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO104
SRK2 (r=70)	70 km/h	150 m	SRK2
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO105
Stop	-	53 m	Stop1
SLK2 (r=70)	70 km/h	150 m	SLK2
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO106
Landstraße AO	70 km/h	500 m	AO71
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO107
Landstraße AO	70 km/h	500 m	AO72
Kurze starke Steigung (10%)	100 km/h	400 m	SUS
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO108
Langes starkes Gefälle (10%)	70 km/h	800 m	SUL
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO109
Kurzes steiles Gefälle (10%)	100 km/h	400 m	SDS
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO110
SLK3 (r=70)	70 km/h	150 m	SLK3
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO111
Lange starke Steigung (10%)	100 km/h	800 m	SUL2
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO112
Langes steiles Gefälle (10%)	100 km/h	800 m	SDL2
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO113
Ortsbeginn	-	50 m	OB
Straße IO	50 km/h	250 m	IO50
SRK1 (r=70)	50 km/h	150 m	IOSRK1

Straße IO	50 km/h	250 m	IO51
Stop	-	83 m	Stop2
Straße IO	50 km/h	250 m	IO52
Stop	-	53 m	Stop3
Straße IO	50 km/h	250 m	IO53
Stop	-	83 m	Stop4
Straße IO	50 km/h	250 m	IO54
Straße IO	30 km/h	500 m	IO31
SRK2 (r=70)	50 km/h	150 m	IOSRK2
Straße IO	50 km/h	250 m	IO55
Kurze starke Steigung (10%)	50 km/h	400 m	IOSUS
Straße IO	50 km/h	250 m	IO56
Langes starke Gefälle (10%)	50 km/h	800 m	IOSDL
Straße IO	50 km/h	250 m	IO57
Stop	-	83 m	Stop5
Straße IO	50 km/h	250 m	IO58
Stop	-	53 m	Stop6
Straße IO	50 km/h	250 m	IO59
SRK3 (r=70)	50 km/h	150 m	IOSRK3
Straße IO	50 km/h	250 m	IO60
Straße IO	30 km/h	500 m	IO32
Ortsende	-	50 m	OE

6.2.2 Studie III: Limitierung von Drehmoment und Leistung

Tabelle 20: Chronologischer Überblick der Teststrecke in Studie III. Für Studie I wurde die Teststrecke gekürzt und bestand aus den Abschnitten „Außerorts 1“ und „Stadt 2“.

Situation	Geschwindigkeitslimit	Länge	Kurzbezeichnung
Außerorts 1, Landstraße	100 km/h	100 m	AO101
Landstraße, AO	70 km/h	50 m	AO71
SRK1 (r=70)	70 km/h	150 m	SK_71
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO102
WLK (r=200m)	100 km/h	150 m	WK1
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO103
SLK (r=70)	100 km/h	150 m	SK1
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO104
Landstraße AO	70 km/h	50 m	AO72
SRK2 (r=70)	70 km/h	150 m	SK_72
Landstraße AO	70 km/h	50 m	AO73
Straße IO	50 km/h	50 m	AO51
Stop		53 m	Stop
SLK2 (r=70)	100 km/h	150 m	SK2
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO105
Lange starke Steigung (10%)	100 km/h	800 m	SUL1
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO106
Landstraße AO	70 km/h	50 m	AO74
Langes starkes Gefälle (10%)	70 km/h	800 m	SDL_71
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO107
SLK3 (r=70)	100 km/h	150 m	SK3
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO108
Landstraße AO	70 km/h	50 m	AO75
Lange starke Steigung (10%)	70 km/h	800 m	SUL2
Landstraße AO	50 km/h	25 m	AO52
Langes steiles Gefälle (10%)	50 km/h	800 m	SDL_51
Landstraße AO	100/50 km/h	100 m	AO109
Stop		53 m	Stop
Stadt 1, Ortsbeginn	50 km/h	50 m	OB1
Straße IO	50 km/h	100 m	IO51
Straße IO	30 km/h	200 m	IO31

SRK1 (r=70)	30 km/h	150 m	IOSK1
Straße IO	50 km/h	250 m	IO52
Weite Kurve (r=200m)	50 km/h	150 m	IOWK1
Kurzer flacher Anstieg	50 km/h	400 m	IO_FUS1
Straße IO	50 km/h	100 m	IO53
Kurzes flaches Gefälle	50 km/h	400 m	IO_FDS1
Straße IO	50 km/h	100 m	IO54
Stop		83 m	Stop
Straße IO	50 km/h	350 m	IO55
Weite Kurve (r=200m)	50 km/h	150 m	IOWK2
Straße IO	50 km/h	200 m	IO56
Ortsende	50 km/h	50 m	OE1
Außerorts 2, Landstraße	100 km/h	100 m	AO110
Landstraße AO	70 km/h	250 m	AO76
Weite Linkskurve (r=200m)	70 km/h	150 m	WLK_72
Landstraße AO	70 km/h	250 m	AO77
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO111
Stop		53 m	Stop
Stadt 2, Ortsbeginn	50 km/h	50 m	OB2
Straße IO	50 km/h	100 m	IO59
SRK1 (r=70)	50 km/h	150 m	IOSRK1
Straße IO	50 km/h	100 m	IO60
Stop		83 m	Stop
Straße IO	30 km/h	225 m	IO32
Stop		83 m	Stop
Straße IO	30 km/h	200 m	IO33
Straße IO	50 km/h	25 m	IO62
SLK1 (r=70m)	50 km/h	150 m	IOSRK2
Straße IO	50 km/h	100 m	IO63
Stop		83 m	Stop
Straße IO	50 km/h	100 m	IO64
SRK2 (r=70)	50 km/h	150 m	IOSRK3
Straße IO	50 km/h	100 m	IO66
Ortsende	50 km/h	50 m	OE

6.2.3 Studie IV: Das aktive Beschleunigungspedal

Tabelle 21: Chronologischer Überblick der Teststrecke in Studie IV.

Situation	Geschwindigkeitslimit	Länge	Kurzbezeichnung
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO101
Landstraße, AO	70 km/h	100 m	AO71
SRK1 (r=70)	70 km/h	150 m	Kurve1
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO102
WLK (r=200m)	100 km/h	150 m	Kurve2
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO103
SLK (r=70)	100 km/h	150 m	Kurve3
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO104
Landstraße AO	70 km/h	100 m	AO72
SRK2 (r=70)	70 km/h	150 m	Kurve4
Landstraße AO	70 km/h	100 m	AO73
Straße IO	50 km/h	50 m	AO51
Stop	-	53 m	Stop1
SLK2 (r=70)	100 km/h	150 m	Kurve5
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO105
Lange starke Steigung (10%)	100 km/h	800 m	SUL1
Landstraße AO	100 km/h	350 m	AO106
Langes starkes Gefälle (10%)	70 km/h	800 m	SDL1
Landstraße AO	100 km/h	100 m	AO107
SLK2 (r=70)	100 km/h	150 m	Kurve6
Landstraße AO	100 km/h	250 m	AO108
Landstraße AO	70 km/h	100 m	AO74
Lange starke Steigung (10%)	70 km/h	800 m	SUL71
Landstraße AO	70 km/h	100 m	AO75
Langes starkes Gefälle (10%)	70 km/h	800 m	SDL71
SLK2 (r=70)	100 km/h	150 m	Kurve7
Landstraße AO	100 km/h	750 m	AO109
Stop	-	53 m	Stop2
Straße IO	50 km/h	50 m	OB
Straße IO	50 km/h	100 m	IO51
SRK1 (r=70)	50 km/h	150 m	IOKurve1
Straße IO	50 km/h	100 m	IO52

Stop	-	83 m	Stop3
Straße IO	50 km/h	225 m	IO53
Stop	-	83 m	Stop4
Straße IO	30 km/h	200 m	IO31
Straße IO	50 km/h	25 m	IO54
SLK1	50 km/h	150 m	IOKurve2
Straße IO	50 km/h	100 m	IO55
Stop	-	83 m	Stop5
Straße IO	50 km/h	100 m	IO56
SRK2 (r=70)	50 km/h	150 m	IOKurve3
Straße IO	50 km/h	100 m	IO57
Ortsende	50 km/h	50 m	OE

6.3 TABELLEN UND STATISTIKEN

6.3.1 Studie I: Das kombinierte Fahrbremspedal

Tabelle 22: Ergebnissen von *t*-Tests für abhängige Stichproben, für alle Situationen, in denen mit CPS signifikant weniger Energie verbraucht wurde als mit SPS. AVn: „mittlere Geschwindigkeit“ (*v*), „mittlere Beschleunigung“ (*ax*), „mittlere Summe aus der Batterie entnommener Energie“ (*pos. kWh*), „mittlere Summe rekuperierter Energie“ (*neg. kWh*).

Situation	Statistik	Grund für Energiebilanz CPS<SPS
AOS	v: $t(23) = -0.43$; $p = .675$ ax: $t(23) = -0.95$; $p = .353$ pos. kWh: $t(23) = -2.55$; $p = .018$	Stärkeres Beschleunigen mit SPS
AO71	v: $t(23) = -4.13$; $p < .001$ ax: $t(23) = -2.50$; $p = .020$ pos. kWh: $t(23) = -2.57$; $p = .017$	Stärkeres Beschleunigen mit SPS
SRK1	v: $t(23) = -4.94$; $p < .001$ ax: $t(23) = -1.73$; $p = .096$ pos. kWh: $t(23) = -2.81$; $p = .010$	Stärkeres Beschleunigen mit SPS
SLK1	v: $t(23) = -3.80$; $p < .001$ ax: $t(23) = -2.61$; $p = .016$ pos. kWh: $t(16) = 0.38$; $p = .706$ neg. kWh: $t(9) = -4.67$; $p = .003$	Lösen des Beschleunigungspedals und daher mehr zurückgewonnene Energie mit CPS
AO105	v: $t(23) = -1.91$; $p = .068$ ax: $t(23) = -3.16$; $p = .004$ pos. kWh: $t(13) = 1.17$; $p = .263$ neg. kWh: $t(4) = -2.18$; $p = .095$	Lösen des Beschleunigungspedals und daher mehr zurückgewonnene Energie mit CPS
SDL1	v: $t(23) = -9.17$; $p < .001$ ax: $t(23) = -0.605$; $p = .551$ pos. kWh: $t(22) = 2.19$; $p = .040$ neg. kWh: $t(22) = -4.18$; $p < .001$	Lösen des Beschleunigungspedals und daher mehr zurückgewonnene Energie mit CPS
AO107	v: $t(23) = -3.30$; $p = .003$ ax: $t(23) = -1.81$; $p = .083$ pos. kWh: $t(18) = -0.09$; $p = .933$ neg. kWh: $t(7) = -6.65$; $p < .001$	Lösen des Beschleunigungspedals und daher mehr zurückgewonnene Energie mit CPS
SUL7	v: $t(23) = -9.45$; $p < .001$ ax: $t(23) = -1.79$; $p = .086$ pos. kWh: $t(22) = 0.218$; $p = .829$ neg. kWh: $t(15) = -4.30$; $p = .001$	Lösen des Beschleunigungspedals und daher mehr zurückgewonnene Energie mit CPS
AO52	v: $t(23) = -9.45$; $p < .001$ ax: $t(23) = -1.79$; $p = .086$ pos. kWh: $t(2) = -1.76$; $p = .221$ neg. kWh: $t(17) = -2.59$; $p = .019$	Lösen des Beschleunigungspedals und daher mehr zurückgewonnene Energie mit CPS
OB	v: $t(23) = -0.58$; $p = .568$ ax: $t(23) = -1.82$; $p = .082$ pos kWh: $t(2) = -1.77$; $p = .090$	Stärkeres Beschleunigen mit SPS
IO52	v: $t(23) = -5.80$; $p < .001$ ax: $t(23) = -1.92$; $p = .068$ pos kWh: $t(2) = -1.76$; $p = .221$ neg kWh: $t(23) = -2.55$; $p = .018$	Lösen des Beschleunigungspedals und daher mehr zurückgewonnene Energie mit CPS
IO54	v: $t(23) = -5.66$; $p < .001$ ax: $t(23) = -2.03$; $p = .054$ pos kWh: $t(1) = -0.32$; $p = .801$ neg kWh: $t(23) = -3.53$; $p = .002$	Lösen des Beschleunigungspedals und daher mehr zurückgewonnene Energie mit CPS

6.3.2 Studie II: Die Stärke der rekuperativen Bremse

Tabelle 23: Ergebnissen von Varianzanalysen mit Messwiederholung für die Situationen, in denen es einen signifikanten Effekt der Rekuperationsstärke auf den Gesamtverbrauch gab. AVn: „mittlere Geschwindigkeit“ (v), „mittlere Beschleunigung“ (ax), mittlerer Verbrauch (sum. kW), „mittlere Summe aus der Batterie entnommener Energie“ (pos. kW), „mittlere Summe rekuperierter Energie“ (neg. kW).

Situation	Statistik	Grund für Energiedifferenz
AO103	v: $F(2, 10) = 1.82, p = .212$ ax: $F(2, 10) = 9.79, p = .004$ sum. kW: $F(2, 10) = 8.45, p = .007$ pos. kW: $F(2, 10) = 4.27, p = .046$ neg. kW: $F(2, 10) = 9.49, p = .005$	Fahrer verzögern wegen Geschwindigkeitsbegrenzung (70er-Zone). Rekuperationsvorteil mit starker rekuperativer Bremse.
AO105	v: $F(2, 10) = 0.55, p = .591$ ax: $F(2, 10) = 3.44, p = .073$ sum. kW: $F(2, 10) = 19.81, p < .001$ pos. kW: $F(2, 10) = 2.39, p = .142$ neg. kW: $F(2, 10) = 29.93, p < .001$	Fahrer verzögern wegen Geschwindigkeitsbegrenzung (70er-Zone). Rekuperationsvorteil mit starker rekuperativer Bremse.
AO106	v: $F(2, 10) = 4.48, p = .041$ ax: $F(2, 10) = 56.52, p < .001$ sum. kW: $F(2, 10) = 58.59, p < .001$ pos. kW: $F(2, 10) = 9.89, p = .004$ neg. kW: $F(2, 10) = 41.63, p < .001$	Fahrer beschleunigen zunächst wegen vorhergehenden Situationen (Stop und Kurve) und beginnen dann wegen nachfolgender Geschwindigkeitsbegrenzung zu verzögern (70er-Zone). Rekuperationsvorteil mit starker rekuperativer Bremse
AO112	v: $F(2, 10) = 131, p = .313$ ax: $F(2, 10) = 2.00, p = .187$ sum. kW: $F(2, 10) = 6.92, p = .013$ pos. kW: $F(2, 10) = 0.37, p = .699$ neg. kW: $F(2, 10) = 10.87, p = .003$	Fahrer verzögern wegen nachfolgender Geschwindigkeitsbegrenzung. Rekuperationsvorteil mit starker rekuperativer Bremse.
IO53	v: $F(2, 10) = 0.30, p = .748$ ax: $F(2, 10) = 4.64, p = .037$ sum. kW: $F(2, 10) = 3.23, p = .083$ pos. kW: $F(2, 10) = 0.09, p = .917$ neg. kW: $F(2, 10) = 0.97, p = .412$	Fahrer verzögern wegen nachfolgender Kreuzung. Tendenz eines Rekuperationsvorteils mit starker rekuperativer Bremse.
IO54	v: $F(2, 10) = 0.27, p = .771$ ax: $F(2, 10) = 5.23, p = .024$ sum. kW: $F(2, 10) = 3.37, p = .076$ pos. kW: $F(2, 10) = 0.11, p = .901$ neg. kW: $F(2, 10) = 8.87, p = .006$	Fahrer beschleunigen zunächst aus dem Stillstand und beginnen dann wegen nachfolgender Kreuzung zu verzögern. Rekuperationsvorteil mit starker rekuperativer Bremse.
IO56	v: $F(2, 10) = 0.30, p = .750$ ax: $F(2, 10) = 3.66, p = .064$ sum. kW: $F(2, 10) = 4.36, p = .044$ pos. kW: $F(2, 10) = 5.66, p = .027$ neg. kW: ---	Kuppe nach Anstieg und vor Gefälle. Grund für unterschiedliche Verbräuche unklar.
IOSDL	v: $F(2, 10) = 2.22, p = .159$ ax: $F(2, 10) = 2.08, p = .176$ sum. kW: $F(2, 10) = 29.37, p < .001$ pos. kW: $F(2, 10) = 1.03, p = .391$ neg. kW: $F(2, 10) = 55.13, p < .001$	Gefälle. Rekuperationsvorteil mit starker rekuperativer Bremse.
SLK1	v: $F(2, 10) = 2.91, p = .101$ ax: $F(2, 10) = 10.73, p = .003$ sum. kW: $F(2, 10) = 11.09, p = .003$ pos. kW: $F(2, 10) = 23.47, p < .001$ neg. kW: $F(2, 10) = 0.15, p = .861$	Von 100 km/h kommend wird verzögert und anschließend wieder herausbeschleunigt. Mit starker rekuperativer Bremse wird früher begonnen herauszubeschleunigen. Starke rekuperative Bremse ist in dieser Situation von Nachteil
SRK1	v: $F(2, 10) = 2.09, p = .174$ ax: $F(2, 10) = 4.54, p = .040$ sum. kW: $F(2, 10) = 4.63, p = .038$ pos. kW: $F(2, 10) = 3.81, p = .059$ neg. kW: $F(2, 10) = 0.15, p = .861$	Mit starker rekuperativer Bremse wird früher begonnen herauszubeschleunigen. Starke rekuperative Bremse ist in dieser Situation von Nachteil

6.3.3 Studie III: Limitierung von Drehmoment und Leistung

Für die nachfolgenden Tabellen werden folgende Abkürzungen verwendet: noLim = unlimitiertes Fahrzeug (BAS), „-“ = schwach limitiert (Nm- oder kW-), „- -“ = stark limitiert (Nm - - oder kW - -).

6.3.3.1 Fahrdaten

Tabelle 24: Mittelwerte und Standardabweichungen für diverse Fahrverhaltensparameter.

	BAS	Nm -	Nm - -	kW -	kW - -
Mittl. Geschwindigkeit	50.90 (2.71)	50.15 (2.31)	48.67 (3.22)	50.13 (3.84)	48.75 (2.70)
SD Geschwindigkeit	22.69 (1.84)	23.12 (1.99)	23.25 (1.55)	22.03 (2.07)	20.41 (1.93)
Mittl. Beschl. (ax>0)	0.65 (0.07)	0.58 (0.06)	0.53 (0.05)	0.61(0.06)	0.53 (0.04)
Mittl. Verzög. (ax<0; RB + HB)	-0.49 (0.08)	-0.49 (0.08)	-0.49 (0.10)	-0.49 (0.08)	-0.46 (0.08)
Mittl. Verzög. (ax<0; nur RB)	-0.45 (0.07)	-0.43 (0.07)	-0.44 (0.10)	-0.42 (0.07)	-0.39 (0.06)
% der Zeit HB genutzt	3.88 (11.85)	3.23 (6.49)	3.98 (11.80)	3.31 (6.27)	2.92 (3.78)
% der Zeit RB genutzt	26.25 (2.91)	25.33 (2.89)	23.62 (2.66)	25.92 (2.53)	23.69 (3.15)
% der Zeit gesehelt	17.93 (4.38)	14.57 (3.40)	13.00 (3.02)	17.59 (3.08)	15.61 (2.96)

Tabelle 25: Ergebnisse von t-Tests für abhängige Stichproben für diverse Fahrverhaltensparameter.

Parameter	Bedingung	noLim vs. -	noLim vs.--	- vs. --
Mittl. Geschwindigkeit	Limitiertes Drehmoment	t(23) = 1.72, p = .100	t(23) = 3.73, p = .001	t(23) = 2.60, p = .016
	Limitierte Leistung	t(23) = 1.01, p = .323	t(23) = 3.76, p = .001	t(23) = 1.89, p = .071
	SD Geschwindigkeit	Limitierte Leistung	t(23) = 1.67, p = .108	t(23) = 9.05, p < .001
% der Zeit Leistung aus Batterie entnommen	Limitiertes Drehmoment	t(23) = -1.88, p = .072	t(23) = -4.26, p < .001	t(23) = -3.77, p = .001
	Limitierte Leistung	t(23) = -0.66, p = .513	t(23) = -3.76, p = .001	t(23) = -3.24, p = .004
	Mittl. Beschl. (ax>0)	Limitiertes Drehmoment	t(23) = 7.08, p < .001	t(23) = 10.00, p < .001
Limitierte Leistung		t(23) = 3.62, p = .001	t(23) = 9.89, p < .001	t(23) = 7.56, p < .001
Mittl. Verzög. (ax<0; RB + HB)		Limitierte Leistung	t(23) = -0.76, p = .452	t(23) = -2.28, p = .032
	Mittl. Verzög. (ax<0; nur RB)	Limitiertes Drehmoment	t(23) = -1.28, p = .214	t(23) = -0.39, p = .698
Limitierte Leistung		t(23) = -2.57, p = .017	t(23) = -4.25, p < .001	t(23) = -2.77, p = .011
% der Zeit gesehelt		Limitiertes Drehmoment	t(23) = 3.63, p = .001	t(23) = 7.98, p < .001
	Limitierte Leistung	t(23) = 0.45, p = .657	t(23) = 2.27, p = .033	t(23) = 2.18, p = .040
	% der Zeit RB genutzt	Limitiertes Drehmoment	t(23) = 1.75, p = .093	t(23) = 4.12, p = .000
Limitierte Leistung		t(23) = 0.54, p = .593	t(23) = 3.83, p = .001	t(23) = 3.27, p = .003

6.3.3.2 Verbrauch

Table 26: Mittelwerte und Standardabweichungen für die Summe der entnommenen und rekuperierten Energie je Versuchsbedingung.

Parameter	Bedingung				
	noLim	Nm-	Nm - -	kW -	kW - -
Entnommene kW	2.76 (0.23)	2.62 (0.20)	2.53 (0.23)	2.67 (0.23)	2.34 (0.15)
Rekuperierte kW	-0.78 (0.11)	-0.76 (0.09)	-0.73 (0.11)	-0.77 (0.12)	-0.65 (0.09)

Table 27: Ergebnisse von Varianzanalysen mit Messwiederholung und Post-hoc-Tests für abhängige Stichproben für die Summe der entnommenen und rekuperierten Energie.

		Haupteffekt	Post-hoc		
			noLim vs. -	noLim vs.--	- vs. --
Entnommene Energie	Limitiertes Drehmoment	F(2, 46) = 14.45, p < .001	t(23) = 3.04, p = .006	t(23) = 4.96, p < .001	t(23) = 2.54, p = .018
	Limitierte Leistung	F(2, 46) = 85.94, p < .001	t(23) = 3.63, p = .001	t(23) = 10.62, p < .001	t(23) = 9.74, p < .001
Rekuperierte Energie	Limitiertes Drehmoment	F(2, 46) = 3.69, p = .033	t(23) = -1.31, p = .203	t(23) = -2.69, p = .013	t(23) = -1.41, p = .172
	Limitierte Leistung	F(2, 46) = 49.12, p < .001	t(23) = -1.46, p = .158	t(23) = -8.03, p < .001	t(23) = -7.55, p < .001

6.3.3.3 Fahrertypenanalyse

Table 28: Ergebnisse von Varianzanalysen mit Messwiederholung und Post-hoc-Tests für abhängige Stichproben, getrennt für effiziente und ineffiziente Fahrer. AV: „Gesamtverbrauch“.

		Haupteffekt	Post-hoc		
			noLim vs. -	noLim vs.--	- vs. --
Effiziente Fahrer	Limitiertes Drehmoment	F(2, 22) = 8.35, p = .002	t(11) = 2.26, p = .045	t(11) = 3.72, p = .003	t(11) = 2.03, p = .067
	Limitierte Leistung	F(2, 22) = 43.41, p < .001	t(11) = 1.80, p = .099	t(11) = 10.56, p < .001	t(11) = 6.85, p < .001
Ineffiziente Fahrer	Limitiertes Drehmoment	F(2, 22) = 12.51, p < .001	t(11) = 3.14, p = .009	t(11) = 4.46, p = .001	t(11) = 2.10, p = .059
	Limitierte Leistung	F(2, 22) = 55.36, p < .001	t(11) = 4.20, p = .001	t(11) = 7.90, p < .001	t(11) = 7.96, p < .001

Table 29: Ergebnisse von t-Tests für unabhängige Stichproben. UV: „Fahrertyp“ (effiziente vs. ineffiziente Fahrer). AV: „Gesamtverbrauch“.

Versuchsbedingung	Post-hoc		
	noLim	-	--
Limitiertes Drehmoment	t(22) = 7.16, p < .001	t(22) = 3.43, p = .002	t(22) = 1.68, p = .108
Limitierte Leistung	t(22) = 7.16, p < .001	t(22) = 5.73, p < .001	t(22) = 3.11, p = .005

6.3.3.4 Situationsanalyse

Tabelle 30: Überblick über alle Situationen, in denen es einen signifikanten Effekt der Versuchsbedingung auf den Gesamtverbrauch gab. Ein „X“ markiert, dass die Varianzanalyse mit dem Messwiederholungsfaktor Drehmoment/Leistung einen p-Wert kleiner .005 ergab und markiert die Richtung des Effektes, der in der jeweiligen Spalte gekennzeichnet ist.

	Richtung des Effekts bei limitiertem Drehmoment			Richtung des Effekts bei limitierter Leistung			Grund für Energiedifferenz wenn das Drehmoment limitiert ist (Nm) oder die Leistung limitiert ist (kW)
	Nm<noLim	Nm> noLim	Nm= noLim	kW< noLim	kW> noLim	kW= noLim	
AO101	x			x			Nm/kW: Anfahren und Beschl. bei höheren Geschw.
Stop1	x			x			Nm/kW: Anfahren und Beschl. bei höheren Geschw.
Stop2	x			x			Nm/kW: Anfahren und Beschl. bei höheren Geschw.
Stop3	x			x			Nm/kW: Anfahren und Beschl. bei höheren Geschw.
Stop4	x			x			Nm/kW: Anfahren und Beschl. bei höheren Geschw.
Stop5	x			x			Nm/kW: Anfahren und Beschl. bei höheren Geschw.
Stop6	x			x			Nm/kW: Anfahren und Beschl. bei höheren Geschw.
Stop7	x			x			Nm/kW: Anfahren und Beschl. bei höheren Geschw.
SK_71			x	(BAS=kW--)>kW-			kW: unklar
AO107			x		x		kW: unklar
IO54			x	x			kW: unklar
AO71		x				x	Nm: Im Vgl. zu BAS wird immer noch beschleunigt
AO103		x			x		Nm/kW: Im Vgl. zu BAS wird immer noch beschleunigt
OB1		x			x		Nm/kW: Im Vgl. zu BAS wird immer noch beschleunigt
IO55		x				x	Nm: Im Vgl. zu BAS wird immer noch beschleunigt
IO56			x		x		kW: Im Vgl. zu BAS wird immer noch beschleunigt
AO76			x		x		kW: Im Vgl. zu BAS wird immer noch beschleunigt

	Richtung des Effekts bei limitiertem Drehmoment			Richtung des Effekts bei limitierter Leistung			Grund für Energiedifferenz
	Nm<BAS	Nm>BAS	Nm=BAS	kW<BAS	kW>BAS	kW=BAS	
OB2		x			x		Nm/kW: Im Vgl. zu BAS wird immer noch beschleunigt
IO32		x				x	Nm/kW: Im Vgl. zu BAS wird immer noch beschleunigt
AO74			x		x		kW: Beschleunigen noch immer, während in BAS bereits rekuperiert wird
AO102			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
WK1			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
SK_72			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
AO105			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
SUL1			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
AO106			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
SUL2			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
OE1			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
AO77			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
SK_103			x	x			kW: Beschleunigen bei höheren Geschw.
AO73		x			x		Nm/kW: Weniger rekuperierte Energie, Grund unklar (Nm/kW)
AO51			x		x		kW: Weniger rekuperierte Energie
AO108			x		x		kW: Weniger rekuperierte Energie
AO75			x		x		kW: Weniger rekuperierte Energie
IO31	x					x	Nm: Anfahren (Überholsituation stehendes Fahrzeug)

6.3.4 Studie IV: Das aktive Beschleunigungspedal

6.3.4.1 Verbrauch

Tabelle 31: Ergebnisse von Varianzanalysen mit Messwiederholung für den Gesamtverbrauch.

Vergleich	Statistik
BAS – LIM	$F(1, 17) = 45.27, p < .001, \eta_p^2 = 0.727$
BAS – AAP_LIM	$F(1, 17) = 56.11, p < .001, \eta_p^2 = 0.767$
BAS – AAP+	$F(1, 17) = 50.11, p < .001, \eta_p^2 = 0.747$
LIM – AAP_LIM	$F(1, 17) = 5.23, p = .035, \eta_p^2 = 0.235$
LIM – AAP+	$F(1, 17) = 0.73, p = .405, \eta_p^2 = 0.041$
AAP – AAP+	$F(1, 17) = 6.72, p = .019, \eta_p^2 = 0.283$

Tabelle 32: Ergebnisse von Varianzanalysen mit Messwiederholung für entnommene und recuperierte Energie.

Vergleich	Energie	Statistik
BAS – LIM	entnommen	$F(1, 17) = 36.50, p < .001, \eta_p^2 = 0.682$
	recuperiert	$F(1, 17) = 23.87, p < .001, \eta_p^2 = 0.584$
BAS – AAP_Lim	entnommen	$F(1, 17) = 44.60, p < .001, \eta_p^2 = 0.724$
	recuperiert	$F(1, 17) = 27.55, p < .001, \eta_p^2 = 0.618$
BAS – AAP+	entnommen	$F(1, 17) = 29.72, p < .001, \eta_p^2 = 0.636$
	recuperiert	$F(1, 17) = 10.88, p = .004, \eta_p^2 = 0.390$
LIM – AAP_Lim	entnommen	$F(1, 17) = 4.46, p = .050, \eta_p^2 = 0.208$
	recuperiert	$F(1, 17) = 1.85, p = .192, \eta_p^2 = 0.098$
LIM - AAP+	entnommen	$F(1, 17) = 4.29, p = .054, \eta_p^2 = 0.201$
	recuperiert	$F(1, 17) = 9.23, p = .007, \eta_p^2 = 0.352$
AAP_Lim - AAP+	entnommen	$F(1, 17) = 14.82, p = .001, \eta_p^2 = 0.466$
	recuperiert	$F(1, 17) = 22.09, p < .001, \eta_p^2 = 0.565$

6.3.4.2 Weitere Interviewdaten

Tabelle 33: Einstellung gegenüber den drei Eco-Assistenten am Ende des Versuches.

LIM	AAP_LIM	AAP+
+ 63 % favorisieren LIM	+ 5 % favorisieren	+ 26 % favorisieren AAP+
+ 63.2 % positive Einstellung	AAP_LIM	+ 47.4 % positive Einstellung
+ 15.8 % nur unter	+ 42.1 % positive Einstellung	+ 36.8 % nur unter
Einschränkungen positive	+ 10.5 % nur unter	Einschränkungen positive
Einstellung	Einschränkungen positive	Einstellung
+ 21.1 % lehnen LIM ab	Einstellung	+ 15.8 % lehnen AAP+ ab
+ 79.0 % wollen LIM	+ 47.4 % lehnen AAP_Lim	+ 26.3 % wollen AAP+
haben	ab	haben, 36.8 % wollen
	+ 21.1 % wollen AAP_LIM	AAP+ unter bestimmten
	haben	Bedingungen haben

Tabelle 34: Positive Aspekte, die in Zusammenhang mit den jeweiligen Ansätzen genannt wurden.

LIM	AAP_LIM	AAP+
- Stört nicht	- Direktes Feedback, wenn ineffizient	- Man wusste Grund für Feedback
- Kick-Down	- Haptisches Feedback	- Fördert effizientes Fahren
- Hohe Selbstbestimmtheit über volle Leistung	- Hilft sanft zu beschleunigen	- Rekuperationshinweis
- Vermeiden ineffizienter Fahrweisen	- Deutlich spürbar	- Direktes Feedback
- wenig Veränderung gespürt	- Man musste nicht immer auf Leistungsanzeige blicken, um effizient zu fahren	- Man muss nicht immer auf die Leistungsanzeige blicken
- Limitierung nicht zu stark	- Hilft, nicht zu schnell zu fahren	- Haptisches Feedback
- Spart Geld und Energie und schont Umwelt		- Vorhersehbar
		- Vermeiden, geblitzt zu werden
		- Erhöht Sicherheit

Tabelle 35: Negative Aspekte, die in Zusammenhang mit den jeweiligen Ansätzen genannt wurden.

LIM	AAP_LIM	AAP+
- Nicht so gut an Kreuzungen mit Querverkehr	- Schwer Zielgeschwindigkeit zu erreichen	- Widerstand beim Anfahren an Kreuzungen
- Nicht für Berufsverkehr	- Geht nicht auf Verkehrssituationen ein	- Nervig
- Man bleibt zu lange im niedrigen Geschwindigkeitsbereich	- Wusste manchmal nicht warum	- Unsicher, ob dadurch effizienter
	- Hat abgelenkt	- Nicht stark genug
	- Gegen eigenen Willen	- Überfordert
	- Unangenehm	- Manchmal nicht gewusst warum
	- Nicht das Gefühl, effizienter zu fahren	
	- Stört/nervt	
	- Kein Mittelweg möglich	
	- Hat geärgert	
	- Kontrollverlust	
	- Pulsieren des Pedals	

Tabelle 36: Antworten auf die Frage, in welchen Situationen sich die Fahrer von dem jeweiligen Assistenten gestört fühlten und welche Verbesserungsvorschläge sie haben.

LIM	AAP_LIM	AAP+
Wann gestört:	Wann gestört:	Wann gestört:
<ul style="list-style-type: none"> - Gar nicht (8) - Kreuzungen (8) - Bergauf (5) - Beschleunigen bei hohen Geschwindigkeiten (2) - Überholen (1) 	<ul style="list-style-type: none"> - Bergauf (8) - Kreuzungen (6) - Generelles Beschleunigen (4) - Immer (3) - Kurven/ bei Gegenverkehr (1) 	<ul style="list-style-type: none"> - Anfahren an Kreuzungen (14) - Beschleunigen (5) - Geschwindigkeitsüberschreitungen (3) - Überholen im Ort (1) - Rekuperationshinweis (1)
Verbesserungsvorschläge:	Verbesserungsvorschläge:	Verbesserungsvorschläge:
<ul style="list-style-type: none"> - Gewonnene Reichweite anzeigen - Belohnungssystem - Kick-Down-Widerstand verstärken - An-Aus-Knopf 	<ul style="list-style-type: none"> - Möglichkeit, Intensität des Widerstandes individuell einzustellen - Pulsieren des Pedals ausstellen 	<ul style="list-style-type: none"> - Rekuperationshinweis muss präzise sein. Es darf keinen Widerstand beim Anfahren danach geben. - Individuelle Toleranzbereiche für Geschwindigkeiten - An-Aus-Knopf - Widerstand zunehmend aufbauen, kein Pulsieren - Kein Widerstand beim Beschleunigen aus dem Stand.

6.3.4.3 Situationsanalyse

Tabelle 37: Überblick der Ergebnisse der post-hoc-Tests (Richtung der Effekte) für die Situationen in Studie IV, für die es einen signifikanten Effekt der Versuchsbedingung auf den Verbrauch gab, sowie den Grund für die Energiedifferenz. Kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsbedingungen ist mit „=“ gekennzeichnet.

Situation	Post-hoc	Situation	Grund für Energiedifferenz
AO101	BAS>LIM=AAP+>AAP_LIM	Beschleunigen von 0-70 km/h	Alle Assistenten verringern die mittlere Beschleunigung. Mit AAP_LIM mehr Prozent der Zeit ein Widerstand aktiv als mit AAP+
AO71	AAP_LIM>LIM=AAP+=BAS	Nähern an 70er Kurve	Mit AAP_LIM wird immer noch beschleunigt, während in den anderen Bedingungen die Zielgeschwindigkeit schneller erreicht wurde
AO103	Mit BAS am wenigsten Energie	Beschleunigen-Verzögern	Vermutlich Lerneffekt. In der ersten Fahrt (BAS) vielleicht noch unsicher, bzgl. des Radiuses der kommenden Kurve?
AO104	BAS=AAP_LIM=LIM>AAP+	Verzögern auf 70er Zone	Wegen Rekup-Hinweis wird mit AAP+ am meisten Energie rekuperiert und somit die günstigste Energiebilanz erzeugt
Kurve4	BAS=AAP+>LIM=AAP_LIM	Geschwindigkeit halten bei mittlerer Geschwindigkeit	Nicht eindeutig
Stop1	BAS>AAP+=AAP_LIM=LIM	Verzögern 40-0 km/h und Beschleunigen von 0-40 km/h	Mit AAP+ wird am langsamsten in diese Situation hineingefahren (Rekup-Hinweis erhalten). Mit AAP_LIM lange Widerstand aktiv beim Anfahren
Kurve5	BAS=AAP+>LIM=AAP_LIM	Beschleunigen bei mittlerer Geschwindigkeit (40-70 km/h)	Mit AAP_LIM bekommen Fahrer lange Zeit Widerstand (kW). Mit AAP+ kein Widerstand
AO105	BAS>AAP+=AAP_LIM=LIM	Beschleunigen bei hohen Geschwindigkeiten (70-100 km/h)	Alle verbessern Energieeffizienz gleichermaßen
AO108	BAS>LIM=AAP_LIM>CAAP+	Verzögern auf 70er Zone	Rekup-Hinweis mit AAP+
Kurve7	BAS>AAP+=AAP_LIM=LIM	Anfangs mit 70 km/h an die Kurve heran, dann auf 100 km/h rausbeschleunigen	Mit AAP+ erhalten Fahrer v-Hinweis. Mit AAP_LIM und LIM beschleunigen Fahrer aus Kurve weniger stark als mit AAP+
Stop2	BAS>AAP+>LIM=AAP_LIM	Anhalten	Mit AAP+ kürzer Widerstand aktiv als mit AAP_LIM
Stop3	BAS>AAP+=LIM>AAP_LIM	Anhalten	Mit AAP_LIM lange Zeit Widerstand aktiv
Stop4	BAS=AAP+>LIM=AAP_LIM	Anhalten	Mit AAP+ wird wenig rekuperiert, mit AAP_LIM wird wenig Energie entnommen
IO31	BAS=LIM=AAP_LIM>AAP+	30 km/h halten	Mit AAP+ erhalten Fahrer v-Hinweis
IO54	AAP+>BAS=AAP_LIM=LIM	Kommen aus 30er Zone und Beschleunigen auf 50 km/h	Wegen v-Hinweis mit AAP+ in vorhergehender Situation sind diese Fahrer langsamer und müssen nun beschleunigen
IOKurve2	AAP+=BAS=LIM>AAP_LIM	Durchfahren der Kurve	Nicht eindeutig
Stop5	AAP+=BAS=LIM>AAP_LIM	Anhalten	Mit AAP_LIM lange Widerstand aktiv
IOKurve3	BAS=LIM>AAP_LIM=AAP+	Durchfahren der Kurve	Mit AAP+ bekommen Fahrer v-Hinweis. Mit AAP_LIM beschleunigen Fahrer nur schwach
IO57	BAS>AAP_LIM>AAP+=LIM	Geschwindigkeit halten	Mit AAP+ bekommen Fahrer v-Hinweis.

6.3.4.4 Fahrertypenanalyse

Tabelle 38: Ergebnisse von *t*-Tests für unabhängige Stichproben. UV: „Fahrertyp“, AV: „Gesamtverbrauch“.

Fahrertypenvergleich	Versuchsbeding			
	BAS	LIM	AAP_Lim	AAP+
effizient vs. normal	t(10) = -4.77, p = 0.01	t(10) = -1.24, p = .244	t(10) = -1.41, p = .189	t(10) = -0.52, p = .615
effizient vs. sportlich	t(10) = -9.89, p < 0.01	t(10) = -1.48, p = .169	t(10) = -2.13, p = .059	t(10) = -2.26, p = .048
normal vs. sportlich	t(10) = -13.32, p < 0.01	t(10) = -0.41, p = .692	t(10) = -0.29, p = .780	t(10) = -1.83, p = .097

6.4 TESTMATERIALIEN

6.4.1 Studie IV: Das aktive Beschleunigungspedal

6.4.1.1 Fragebogen zur Bewertung des Limitierungsansatzes und des aktiven Beschleunigungspedals

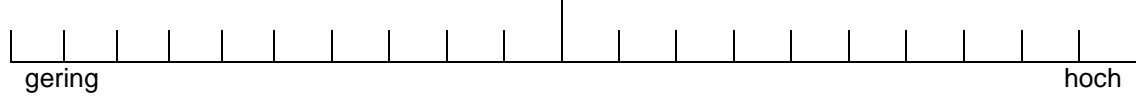
Bitte bewerten Sie die Fahrt mit dem Assistenten anhand des unten stehenden Fragebogens. Denken Sie dabei nicht zu viel nach, sondern entscheiden Sie zügig aus dem Bauch heraus.

	Sehr	Ziemlich	Wenig	Weder noch	Wenig	Ziemlich	Sehr	
nützlich	3	2	1	0	-1	-2	-3	nutzlos
angenehm	3	2	1	0	-1	-2	-3	unangenehm
gut	3	2	1	0	-1	-2	-3	schlecht
nett	3	2	1	0	-1	-2	-3	nervig
wirkungsvoll	3	2	1	0	-1	-2	-3	überflüssig
erfreulich	3	2	1	0	-1	-2	-3	ärgerlich
unterstützend	3	2	1	0	-1	-2	-3	wertlos
wünschenswert	3	2	1	0	-1	-2	-3	nicht wünschenswert
aktivierend	3	2	1	0	-1	-2	-3	einschläfernd

6.4.1.2 Nasa R-TLX

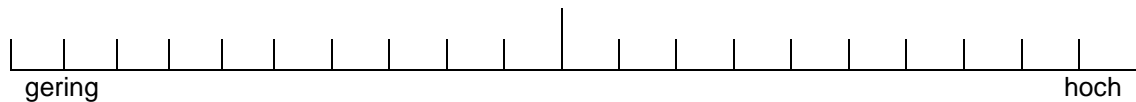
Geistige Anforderung

Wie geistig fordernd war die Fahraufgabe für Sie?



Körperlich Anforderung

Wie stark war die körperliche Anforderung während der Fahrt?



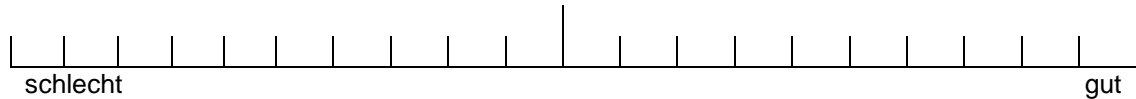
Zeitliche Anforderung

War die Fahraufgabe hektisch oder schnell?



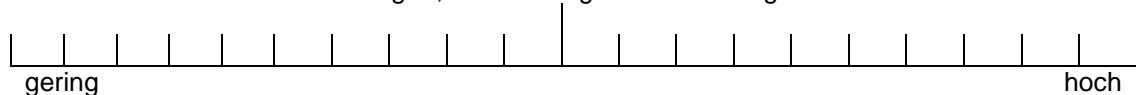
Leistung

Wie erfolgreich waren Sie darin energieeffizient zu fahren?



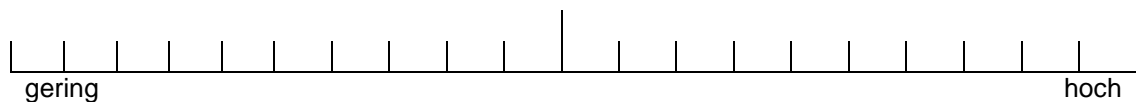
Anstrengung

Wie sehr mussten Sie sich anstrengen, um die Aufgabe zu bewältigen?



Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst oder verärgert waren Sie bei der Bewältigung der Fahraufgabe?



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbstständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit einschließlich Tabellen und Abbildungen, die anderen Werken im Wortlaut oder sinngemäß entnommen sind, kenntlich gemacht habe, dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat, dass sie noch nicht veröffentlicht worden ist und dass ich eine Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde.

Die Bestimmungen der Promotionsordnung der Julius-Maximilians-Universität Würzburg sind mir bekannt.

Die von mir vorgelegte Dissertation wurde von Prof. Dr. Andrea Kiesel betreut.

Würzburg, den 08.04.2016

Monika Jagiełłowicz-Kaufmann