



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Ergonomie

Verbrauchsreduzierung durch Fahrerassistenz unter dem Einfluss  
von Langzeitnutzung und Situationskomplexität

Christoph Perdana Rommerskirchen

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

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

2. Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm

Die Dissertation wurde am 07.02.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 25.07.2018 angenommen.

## Danksagung

Ich möchte allen Danken, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben. Zuallererst möchte ich mich vor allem bei meinem Doktorvater Prof. Klaus Bengler vom Lehrstuhl für Ergonomie für die langjährige Betreuung meiner Promotion, die Möglichkeit an seinem Lehrstuhl wissenschaftlich zu arbeiten und dort auch mit allen Facetten an der universitären Forschung mitzuwirken, bedanken. Die Möglichkeiten die Prof. Bengler mit seinem Lehrstuhl geboten haben, halfen mir ungemein meine Arbeit erfolgreich durchzuführen.

Meiner ehemaligen Betreuerin der Diplomarbeit Frau Dr. rer. nat. Daria Popiv möchte ich danken, dass sie mir als erstes Einblicke und mein Interesse in das Thema vorausschauendes Fahren und den Kontakt an den Lehrstuhl für Ergonomie vermittelt hat. Die lebhaften Diskussionen mit Ihr zu Beginn meiner Promotion haben mir einen guten Start in meine Dissertation ermöglicht.

Meinen Kollegen vom Lehrstuhl danke ich nicht nur für die wissenschaftlichen Diskussionen und ihrer tatkräftigen und moralischen Unterstützung bei Problemen, sondern auch für die gemeinsamen Unternehmungen abseits des universitären Betriebs, inklusive des gemeinsamen Bieres zum Wochenausklang. Besonders hervorheben möchte ich vor allem meinen Bürokollegen Markus Zimmermann, der mich unterstützt, mit mir diskutiert, motiviert und mir auch immer Rückhalt gegeben hat. Auch allen Studenten, deren Arbeiten ich betreuen durfte oder die mich als Hiwis unterstützt haben, möchte ich für deren Engagement, der Unterstützung bei den Studiendurchführungen und den Diskussionen, die auch mein Promotionsthema voranbrachten, bedanken.

Als letztes möchte ich mich bei meinen Eltern, meiner Schwester und meiner Freundin bedanken, die mich immer wieder motiviert haben, meine Themen und Promotion weiterzuverfolgen und mir die nötige moralische Unterstützung gegeben habe. Ohne sie, wäre ich nie so weit gekommen, eine Promotion anzustreben.

## Abstract

Subject of this work is, to gain a deeper knowledge on anticipative advanced driver assistance systems, which support drivers using informative visual in-car displays. One goal of such driver assistance systems is, to reduce the vehicle's fuel consumption, especially in deceleration scenarios by supporting a more anticipative driving behavior. Support of the driver is necessary because he is not able to anticipate all future driving situations. Based on existing studies on different anticipative driver assistance systems, which already could show the effectiveness of such a system in specific situations, this work wants to show that anticipative assistance systems are useful in more complex traffic situations and on long-term usage. The first research question is, if the driving behavior changes in traffic situations that are more complex and therefore the gained fuel reduction with the assistance system changes. In the first study, the complexity of the traffic situations (Environment and Traffic) was changed systematically. The driving and the gaze behavior was analyzed while using the assistance system. The results show, that in situations that are more complex, the gaze behavior changes, but not the driving behavior. The second question is, if there is a change in the driving behavior, when using the assistance system for a longer period. Possible effects on the behavior could be changes in the acceptance and learning effects. For the long-term study, the drivers had to drive three weeks regularly with the anticipative assistance system in the driving simulator. For this purpose, the driving simulator had to be validated for long-term studies, too. The analyses show, that there are no significant changes during the three study weeks and therefore there is a chance of a constant fuel reduction of 10 % per trip when using such a system.

## Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die tiefere Betrachtung von unterstützenden vorausschauenden Fahrerassistenzsystemen, die den Fahrer durch Anzeigen im Fahrzeug unterstützen sollen. Ziel solcher Fahrerassistenzsysteme ist die Verringerung des Kraftstoffverbrauchs durch eine vorausschauendere Fahrweise speziell in Verzögerungssituationen. Eine Unterstützung des Fahrers wird notwendig dadurch, dass der Fahrer nicht in der Lage ist Situationen immer frühzeitig zu antizipieren. Basierend auf schon veröffentlichten Studien zu verschiedenen vorausschauenden Fahrerassistenzsystemen, die den Erfolg für Einzelsituationen zeigen konnten, soll nun auch die Nachhaltigkeit von vorausschauender Fahrerassistenz in komplexen Straßenverkehrssituationen und bei längerfristiger Nutzung, im Gegensatz zu einer einmaligen Nutzung, wie in verschiedene Studien geschehen, nachgewiesen werden. Die erste Hauptfrage ist, ob durch eine erhöhte Situationskomplexität, sich das Verhalten des Fahrers ändert und dadurch die Kraftstoffeinsparungen mit dem Assistenzsystem geringer werden. Dazu wurde in der ersten Studie die Situationskomplexität (Umwelt und Verkehr) systematisch verändert und das Fahr- und Blickverhalten des Fahrers während der Nutzung des vorausschauenden Fahrerassistenzsystems analysiert. Die Analysen zeigen, dass sich, obwohl sich das Blickverhalten verändert, das Fahrverhalten in komplexeren Situation gleichbleibt. Die zweite Hauptfrage der Arbeit ist, ob sich über einen längeren Zeitraum hinweg das Fahrverhalten und damit die Kraftstoffeinsparungen mit dem Assistenzsystem ändern, aufgrund von Lerneffekten als auch aufgrund von Akzeptanzänderungen über die Zeit. Für die Langzeituntersuchungen mussten Probanden über einen Zeitraum von drei Wochen regelmäßige Fahrten im Fahrsimulator mit dem Fahrerassistenzsystem durchführen. Dazu musste auch in dieser Studie der Fahrsimulator als Messmethode für Langzeitversuche validiert werden. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass sich keine signifikanten Änderungen im dreiwöchigen Testzeitraum messen lassen. Damit kann gezeigt werden, dass ein vorausschauendes Fahrerassistenzsystem, wie hier umgesetzt, nachhaltig Einsparungen von ca. 10 % im Kraftstoffverbrauch erzielen können.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel der Arbeit	2
1.2	Aufbau der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>FAHRVERHALTEN UND KRAFTSTOFFVERBRAUCH</b>	<b>4</b>
2.1	Systemergonomische Grundlagen	4
2.2	Physikalische Zusammenhänge zum Kraftstoffverbrauch im Fahrzeug	8
2.3	Unterschiede im Kraftstoffverbrauch durch den Fahrer	13
2.4	Möglichkeiten des Fahrers zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs	20
<b>3</b>	<b>DAS VORAUSSCHAUENDE FAHRERASSISTENZSYSTEM</b>	<b>27</b>
3.1	Antizipatives Fahren	27
3.2	Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme	32
3.3	Grenzen bisheriger Untersuchungen und Untersuchungsziele zu Fahrerassistenzsystemen zum vorausschauenden Fahren	35
<b>4</b>	<b>EINFLUSS DER KOMPLEXITÄT VON FAHRSITUATIONEN AUF DAS NUTZUNGSVERHALTEN MIT DEM FAHRERASSISTENZSYSTEM</b>	<b>37</b>
4.1	Verkehrssituation und Komplexität	37
4.2	Ziele der Studie	39
4.3	Methodik	40
4.3.1	Versuchsaufbau	40
4.3.2	Das vorausschauende Fahrerassistenzsystem	41
4.3.3	Versuchsstrecke	42
4.3.4	Probandenkollektiv und Versuchsablauf	44
4.4	Ergebnisse	45
4.4.1	Kraftstoffverbrauch	46
4.4.2	Geschwindigkeit und Beschleunigung	49
4.4.3	Blickverhalten	54
4.5	Zusammenfassung und Diskussion	56
<b>5</b>	<b>LANGZEITUNTERSUCHUNGEN</b>	<b>58</b>
5.1	Langzeitverhalten bei Fahrerassistenzsystemen und Kraftstoffverbrauch	58
5.1.1	Lernen	58

---

5.1.2	Änderung der Akzeptanz über die Zeit	60
5.1.3	Langzeitstudien zu Fahrerassistenzsystemen	63
5.1.4	Langzeitstudien zum Kraftstoffverbrauch	68
<b>5.2</b>	<b>Methodik von Langzeitstudien</b>	<b>71</b>
5.2.1	Langzeitstudien unter Realbedingungen	71
5.2.2	Unterschiede zwischen Fahrsimulatorstudien und Realfahrzeugstudien	72
<b>5.3</b>	<b>Ziele der Langzeitstudie</b>	<b>75</b>
<b>5.4</b>	<b>Methodik</b>	<b>76</b>
5.4.1	Versuchsumgebung, Probandenkollektiv und Assistenzsystem	76
5.4.2	Streckenaufbau und Situationen	79
5.4.3	Fragebögen	80
5.4.4	Versuchsdurchführung	80
<b>5.5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>82</b>
5.5.1	Ergebnisse der Akzeptanzuntersuchung	82
5.5.2	Ergebnisse des Fahrverhaltens	83
<b>5.6</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse der Langzeitstudie</b>	<b>92</b>
5.6.1	Akzeptanzänderung	93
5.6.2	Zeitliche Änderung des Fahrverhaltens	94
5.6.3	Einfluss auf Fahrten ohne Assistenzsystem	94
5.6.4	Validität des Versuchsaufbaus	95
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>96</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Strukturkreis menschlicher Arbeit und deren Einflüsse (VDI 4006 und Bubb, 2015a).....	5
Abbildung 2-2 Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen, 1983 und Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges, 1982 (aus: Donges, 2009).....	6
Abbildung 2-3: Streckenverbrauch (nach Repmann et al., 2013).....	8
Abbildung 2-4: Typische Verbrauchskennfelder (aus: Pischinger et al., 2013) mit schematischer Darstellung beim Wechsel zu einem höheren Gang .....	9
Abbildung 2-5: Typische schiefe Verteilung der Kraftstoffverbrauchswerte am Beispiel einer Fahrsimulatorstudie (Rommerskirchen et al., 2012).....	16
Abbildung 2-6: Bestimmungssystem für eine verbrauchsgünstige Fahrweise (Dorrer, 2003, S. 55).....	20
Abbildung 3-1: Vorteil des vorausschauenden Fahrens (aus: Popiv, 2012; nach Nöcker et al., 2005).....	28
Abbildung 3-2: Vier Stufen der Informationsverarbeitung im vorausschauenden Fahren (Sommer, 2013) und Einflussfaktoren auf diese.....	30
Abbildung 3-3: Beispiel des Birds-Eye-View Visualisierung des vorausschauenden Fahrerassistenzsystem in Verzögerungssituation (aus: Popiv, 2012) .....	36
Abbildung 4-1: Einflüsse auf die Fahrsituation (Weitzel & Winner, 2012) .....	38
Abbildung 4-2: Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie .....	41
Abbildung 4-3: HMI-Basisanzeige (links) und innerhalb einer Situation mit Geschwindigkeitsbegrenzung und Navigationshinweis (rechts).....	42
Abbildung 4-4: Erhöhung der Komplexität eines Landstraßenszenarios (links, Szenario 2) und eines Stadtszenarios (rechts, Szenario 6).....	44
Abbildung 4-5: Kraftstoffverbrauch im Szenario des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße (Fehlerbalken geben Standardabweichung an) .....	47
Abbildung 4-6: Kraftstoffverbrauch im städtischen Szenario des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel (Fehlerbalken geben Standardabweichung an) .....	48

---

Abbildung 4-7: Geschwindigkeitsverlauf (mittlere Geschwindigkeiten aller Fahrer) der Fahrten mit und ohne Assistenz in der Verkehrssituation des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße.....	50
Abbildung 4-8: Geschwindigkeitsverlauf der Fahrten (mittlere Geschwindigkeiten aller Fahrer) mit und ohne Assistenz in der städtischen Verkehrssituation des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel mit Darstellung des Baustellenbereiches in den komplexeren Situationen	50
Abbildung 4-9: Beschleunigungsverlauf (mittlere Beschleunigungen aller Fahrer) der Fahrten mit und ohne Assistenz in der Verkehrssituation des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße in der niedrigsten Komplexitätsstufe.....	51
Abbildung 4-10: Beschleunigungsverlauf der Fahrten (mittlere Beschleunigung aller Fahrer) mit und ohne Assistenz einer Verkehrssituation in der städtischen Verkehrssituation des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel in der mittleren Komplexitätsstufe.....	52
Abbildung 5-1: Lernkurve für große Stichproben auf einer doppeltlogarithmischen Skala der Versuchsreihe von Snoddy (1926); (neu gezeichnet von Newell & Rosenbloom, 1981) .....	59
Abbildung 5-2: „Technology Acceptance Model 3“ (TAM) aus Venkatesh & Bala (2008) .....	62
Abbildung 5-3: Qualitativer Zufriedenheitsverlauf bei einem ACC-System nach Winner et al. (2003) .....	63
Abbildung 5-4: Gartner’s Hype Cycle für neue Technologien (Fenn, 2006) .....	63
Abbildung 5-5: Prozentsatz der Probanden, denen es leicht oder sehr leicht (Antwort „1“ oder „2“) fällt Annäherungssituationen oder Verzögerungen des Vordermannes im Zusammenhang mit ACC einzuschätzen. (aus: Weinberger, 2000, S. 71).....	65
Abbildung 5-6: Entwicklung der ACC-Akzeptanz und angepasste Power-Law-Funktion aus der Veröffentlichung von Beggiato et al. (2015) .....	67
Abbildung 5-7: Wöchentlicher Kraftstoffverbrauchsverlauf einiger Probanden vor und nach dem Ecotraining (Zeitpunkt 0) aus der Studie von Beusen et al. (2009); (Auszug) .....	70
Abbildung 5-8: Versuchsaufbau zur Langzeitstudie .....	78
Abbildung 5-9: HMI des vorausschauenden Fahrerassistenzsystems im HUD (in der Abbildung, Anzeige nicht übereinstimmend mit der Verkehrssituation; aus Wu, 2013).....	79
Abbildung 5-10: Ablauf der Versuchsdurchführung .....	82
Abbildung 5-11: Entwicklung der Usefulness- und Satisfying-Werte über die Versuchsfahrten aus dem van der Laan Akzeptanzfragebogen .....	83

---



---

Abbildung 5-12: Geschwindigkeitsverlauf (mittlere Geschwindigkeit aller Fahrer) der Fahrten mit und ohne Assistenz in der Verkehrssituation des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf der Landstraße.....	85
Abbildung 5-13: Entwicklung der Reaktionszeit auf die Anzeige über die Fahrten von Versuchsperson 8 und 9 und zugehörige Regressionsgerade .....	88
Abbildung 5-14: Mittlere Reaktionszeiten auf der Landstraße über alle Fahrten mit und ohne Assistenzsystem. Fehlerbalken zeigen Konfidenzintervalle an. ....	91
Abbildung 5-15: Mittlere Geschwindigkeit auf der Landstraße über alle Fahrten mit und ohne Assistenzsystem. Fehlerbalken zeigen Konfidenzintervalle für ein Konfidenzniveau von 95 % an. ....	91
Abbildung 5-16: Mittlere Geschwindigkeitsverläufe für alle Fahrten auf der Landstraße (durchgezogene Linien Fahrten ohne Assistenz, gestrichelte Fahrten mit Assistenz).....	92

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der für die Erledigung von Fahraufgaben zur Verfügung stehenden Zeit und der dafür in Abhängigkeit vom Bearbeitungsniveau benötigten Zeit (aus: Bubb et al., 2015; nach: Hale, Stoop & Hommels, 1990) .....	7
Tabelle 2-2: Einflussgrößen auf den Streckenverbrauch.....	8
Tabelle 2-3: Einflussfaktoren der Kraftfahrzeughersteller auf den Kraftstoffverbrauch (nach: Dorrer, 2003, S. 35).....	10
Tabelle 2-4: Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch durch den Fahrzeughalter und Fahrzeugnutzer (nach: Dorrer, 2003, S. 35) .....	10
Tabelle 2-5: Verbrauchseinfluss durch den Fahrer während der Fahrt (abgewandelt nach: Dorrer, 2003, S. 35) .....	12
Tabelle 2-6: Äußere Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch (aus: Dorrer, 2003) .....	12
Tabelle 2-7: Übersicht über die vom Fahrer erzeugte Variabilität des Kraftstoffverbrauchs .....	14
Tabelle 2-8: Wichtigste Einflussparameter des Fahrverhaltens auf den Kraftstoffverbrauch basierend auf verschiedenen Studien .....	18
Tabelle 3-1: Übersicht über die erzielten Verbrauchseinsparungen von verschiedene Studien zum vorausschauenden Fahren .....	34
Tabelle 4-1: Ergebnisse des Kraftstoffverbrauchs im Szenario des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße (Szenario 2) .....	47
Tabelle 4-2: Ergebnisse des Kraftstoffverbrauchs im städtischen Szenario des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel (Szenario 6).....	48
Tabelle 4-3: Anzahl der signifikanten Änderungen fahrdynamischer Parameter im Vergleich von Fahrten mit und ohne Assistenz in den 18 untersuchten Verkehrssituationen (2 seitiger t-Test mit Messwiederholung) .....	53
Tabelle 4-4: Blickverweildauern auf das HMI in der Verkehrssituation des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße (Szenario 2).....	55
Tabelle 4-5: Blickverweildauern auf das HMI in der städtischen Verkehrssituation des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel (Szenario 6).....	55

Tabelle 5-1: Analyse der Fahrverhaltensvariablen auf der Landstraße beim Zufahren auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung ..... 86

Tabelle 5-2: Ergebnisse der linearen Regression über die Fahrten (x) der Versuchspersonen 8 und 9 ..... 87

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs der Baselinefahrten am ersten Versuchstag mit den Baselinefahrten des letzten Versuchstages mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für die untersuchten Variablen..... 89

Tabelle 5-4: Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs der Baselinefahrten mit den Fahrten mit Assistenzsystem am letzten Versuchstag mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für die untersuchten Variablen ..... 90

# 1 Einleitung

Die Reduktion der durch den Menschen verursachten globalen Erwärmung ist einer der Hauptaufgaben der internationalen Politik. Entsprechend ist das oberste Ziel der Klimapolitik die Verringerung der Treibhausgasemissionen, um der globalen Erwärmung entgegenzuwirken. Deutschland hat sich dabei zum Ziel gesetzt die klimaschädlichen Emissionen bis zum Jahr 2020 um 40 % gegenüber dem Stand von 1990 zu senken (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2014). Der Straßenverkehr gehört zu einer der Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen. Einer der wichtigsten Treibhausgase ist CO<sub>2</sub>. In Deutschland ist der Straßenverkehr für 17,4 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt, 2012). Ziel ist es dementsprechend hier anzusetzen, um die Emissionen zu reduzieren. Das kann auf rein technischer Ebene, ohne direktes Eingreifen des Nutzers, durch die Optimierung der Fahrzeugtechnik oder der Verkehrsflusssteuerung gelöst werden. Alternativ kann der Mensch als Nutzer des Fahrzeugs, in seinen Rollen als Flottenmanager, als Routenplaner oder als Fahrer unterstützen, wie es sich zum Beispiel das von der Europäischen Union geförderte Projekt eCoMove zum Ziel gesetzt hat (Castermans, Brusselmans & Pandazis, 2010).

Dem Fahrer kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, denn dieser kann durch sein Verhalten den Kraftstoffverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich beeinflussen. Nach Wallentowitz & Neunzig (2001) liegen die Emissionsminderungspotentiale des Fahrers in einer Größenordnung, die nur durch hohen Aufwand durch rein technische Maßnahmen erreicht werden können. Auch haben Maßnahmen beim Fahrer einen Einfluss nicht nur auf Neufahrzeuge, sondern auch auf die Bestandsflotte. Der Fahrer muss aber unterstützt werden, um diese Emissionsminderungspotentiale auszuschöpfen. Dies kann durch verschiedene technische Ansätze erfolgen, welche in dieser Arbeit kurz dargestellt werden. Mit die größten Potentiale bietet das vorausschauende oder auch antizipative Fahren. Dadurch ist der Fahrer in der Lage Situationen früher und besser einzuschätzen. Er kann damit entsprechend früher handeln und somit verbrauchsärmer fahren und unnötige Manöver verhindern. Das vorausschauende Fahren kann und wird zum Teil auch schon durch Fahrerassistenzsysteme unterstützt. Bislang wurden vor allem die vorhandenen Einsparpotentiale aufgezeigt und vor allem untersucht wie der Fahrer unterstützt werden kann, aber nicht welcher Einfluss die umgebende Verkehrssituation darauf hat und ob sich die Kraftstoffeinsparungen über die Zeit verändern.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Die Arbeit basiert zum Teil auf den Untersuchungen von Popiv (2012), Popiv, Rakic, Nestler, Bengler & Bubb (2009) und Popiv, Rommerskirchen, Rakic, Duschl & Bengler (2010b), welche für spezifische Situationen und kurze Zeiträume die positive Wirkung von vorausschauenden Fahrerassistenzsystemen auf den Kraftstoffverbrauch zeigen konnten. Das Ziel der Arbeit ist die Frage, ob das unterstützte Fahren von der Straßenverkehrssituation und einer längerfristigen Nutzung, abhängig ist.

Dazu soll genauer untersucht werden, ob die Komplexität von Straßenverkehrssituationen einen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch, das Fahrverhalten und die generelle Interaktion mit dem Fahrerassistenzsystem hat. Hierfür wurde eine Studie mit vorher genau definierten Straßenverkehrssituationen, die systematisch variiert werden, durchgeführt.

Die zweite Frage ist, wie sich die Nutzung eines vorausschauenden Fahrerassistenzsystems über einen längeren Zeitraum (mehrere Wochen) entwickelt. Interessant sind dabei nicht nur Nutzungsänderungen, sondern auch mögliche Änderungen im Verlauf der Akzeptanz. Dafür wurden Probanden zu regelmäßigen Fahrten im Fahrsimulator über einen dreiwöchigen Zeitraum eingeladen. Nebenbei wird untersucht, ob und wie sich der Fahrsimulator als Messmethode für Langzeituntersuchungen eignet. Langzeitstudien wurden bislang vor allem mit Hilfe von Realfahrstudien durchgeführt. Darum ist es auch notwendig, die Validität des Fahrsimulators bei dieser Versuchsmethodik zu überprüfen.

Teile der Arbeit sind im Rahmen des europäischen Projektes „eCoMove – Cooperative Mobility Systems and Services for Energy Efficiency“ ([www.ecomove-project.eu](http://www.ecomove-project.eu)) entstanden.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Der theoretische Teil dieser Arbeit behandelt die systemergonomischen Grundlagen der Fahrzeugführung und die physikalischen Zusammenhänge beim Kraftstoffverbrauch. Es wird der Einfluss des Menschen auf den Kraftstoffverbrauch betrachtet. Mögliche Optimierungspotentiale des Fahrers werden aufgezeigt. Ausführlich wird das antizipative Fahren behandelt und entsprechende Entwicklungen im Bereich der Fahrerassistenzsysteme behandelt, sowie die bisher von der Literatur nicht untersuchten Fragestellungen dargestellt.

Zwei eigene Studien werden in dieser Arbeit vertieft vorgestellt. Die erste behandelt die Fragestellung nach dem Einfluss der Straßenverkehrssituation auf ein vorausschauendes Fah-

rerassistenzsystem. Dazu wird der Begriff Verkehrssituation genauer beleuchtet. Die zweite Untersuchung beschäftigt sich mit der Frage des Langzeitverhaltens mit einem Fahrerassistenzsystem zum vorausschauendem Fahren. Dazu wird sowohl auf die Theorie des Lernverhaltens, als auch auf die Einflüsse der Erfahrung auf die Akzeptanz eingegangen. Außerdem werden verschiedene Langzeitstudien zu Fahrerassistenz und zum vom Fahrer beeinflussten Kraftstoffverbrauch verglichen. Zusätzlich muss auch in diesem Fall die Nutzung von Fahrsimulatoren für Langzeituntersuchungen diskutiert werden.

## 2 Fahrverhalten und Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch im Realbetrieb in einem Fahrzeug hängt von einer Vielzahl verschiedener Faktoren ab. Nach (Redsell, Lucas & Ashford, 1993) und (Dorrer, 2003) beeinflussen das Fahrzeug, die Umwelt, die Fahrstrecke, das verkehrliche Umfeld und das Fahrverhalten den Energieverbrauch im Fahrzeug. Als Fahrverhalten wird dabei analog zu Fastenmeier (1995) das Verhalten des Fahrers zur Erfüllung der Fahraufgabe definiert. Das Fahrverhalten, auch als Fahrweise oder Fahrstil bezeichnet, ist nach der Definition von Mohra (2014) „die Beschreibung aller vom Fahrzeugbetreiber durchgeführten Handlungen zur Bewältigung der primären, sekundären und tertiären Fahraufgaben“. Dies beinhaltet zum Beispiel Pedalbetätigungen, Gangwahl, aber auch die Bedienung der Klimaanlage.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen des Einflusses des Fahrzeugnutzers auf den Kraftstoffverbrauch. Der Fahrzeugnutzer beeinflusst den Verbrauch sowohl durch sein Fahrverhalten, als auch dadurch, in welchem Zustand er sein Fahrzeug betreibt (z.B. Wartung, Nutzung von Nebenaggregaten oder Beladung). Der Einfluss des Fahrers allein kann nach Sivak & Schoettle (2011) bis zu 45% des Verbrauchs ausmachen.

### 2.1 Systemergonomische Grundlagen

Abbildung 2-1 zeigt den Strukturkreis menschlicher Arbeit und Einflüsse auf diesen (VDI 4006 und Bubb, 2015a). Der Fahrer als Mensch in diesem Regelkreisparadigma führt das Fahrzeug (die Maschine). Seine primäre Aufgabe ist es dabei, das Fahrzeug zum Ziel zu führen. Dabei kann die Aufgabe beeinflusst werden durch Nebenziele, wie zum Beispiel möglichst schnell und/oder möglichst sparsam zum Ziel zu kommen. Auch Nebenaufgaben, wie Verbesserung des Komforts (Bedienung der Klimaanlage) oder Kommunikation (Telefonieren) sind möglich. Der Fahrer wird beeinflusst durch seine individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten, die Umgebung, wie zum Beispiel anderer Verkehr und Umweltbedingungen und durch die Ausführung der Interaktions- und Informationsgestaltung zwischen Fahrer und Fahrzeug.

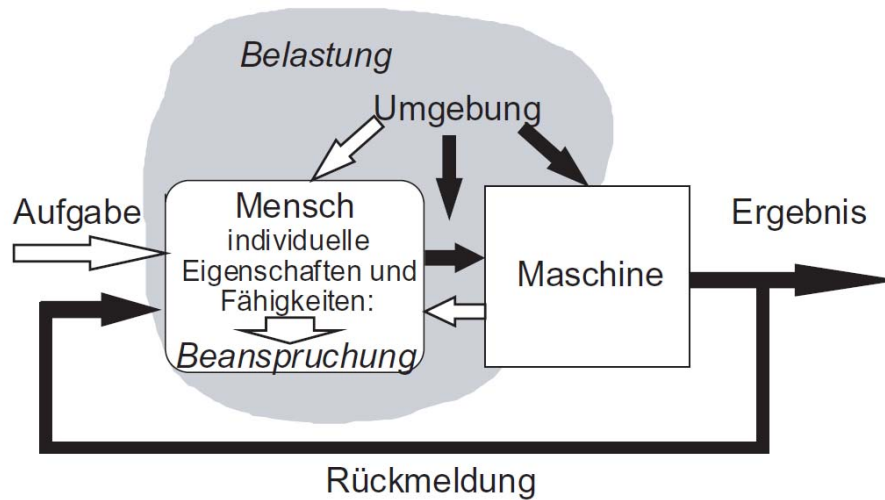


Abbildung 2-1: Strukturkreis menschlicher Arbeit und deren Einflüsse (VDI 4006 und Bubb, 2015a)

Wichtig im Strukturkreis menschlicher Arbeit sind die individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen. Das Modell von Rasmussen (1983) unterteilt die Fähigkeiten und die verbundene Ausführungsgeschwindigkeit von allgemeinen Aufgaben, in die Kategorien Fertigkeitsbasiert, Regelbasiert und Wissensbasiert (Skills, Rules and Knowledge). Dies hat Einfluss auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit. Allgemein werden für die Verarbeitungsgeschwindigkeit für fertigkeitsbasiertes Verhalten unter 200 ms benötigt. Für wissensbasiertes werden 1-2 Sekunden und für regelbasiertes Verhalten einige Sekunden, bis zu Stunden und Tagen gebraucht (Bubb, Vollrath, Reinprecht, Mayer & Körber, 2015). Die Aufgaben, die der Fahrer im Straßenverkehr bearbeiten muss werden in mehrere Aufgabenebenen unterteilt. Nach Donges (1982) gibt es drei Aufgabenebenen der Fahrzeugführung. Es sind die Navigationsaufgabe, die Führungsaufgabe und die Stabilisierungsaufgabe. Die Navigationsaufgabe umfasst die Auswahl der Fahrtroute und folgend daraus die Routenplanung. Die Führungsaufgabe besteht daraus aus der vorliegenden Situation Führungsgrößen wie die Sollspur und die Sollgeschwindigkeit abzuleiten. Auf der Stabilisierungsebene regelt der Fahrer das Fahrzeug mit korrigierenden Eingriffen, um Abweichungen zu kompensieren und das Fahrzeug in der Spur zu halten (Donges, 2009). Entsprechend stehen für die einzelnen Aufgaben unterschiedliche Zeitfenster zur Verfügung. Für die Stabilisierungsaufgabe werden mit einigen 100 ms gerechnet, für die Führungsaufgabe mit ca. 2 s und für die Navigationsaufgabe mit Minuten bis zu Stunden (Donges, 2009; Bubb et al., 2015). Donges (1999) verknüpft die Modelle für das Verarbeitungsniveau von Rasmussen (1983) und die Fahraufgaben (Donges, 1982). Das Ergebnis ist in Abbildung 2-2 zu sehen.





Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der für die Erledigung von Fahraufgaben zur Verfügung stehenden Zeit und der dafür in Abhängigkeit vom Bearbeitungsniveau benötigten Zeit (aus: Bubb et al., 2015; nach: Hale, Stoop & Hommels, 1990)

Aufgabe		Verarbeitungsniveau		
		Fertigkeitsbasiert < 200 ms	Regelbasiert Sekunden bis Minuten	Wissensbasiert Minuten bis Stunden
Zur Verfügung stehende Zeit	Navigation (mehrere Sekunden bis Stunden)	Täglicher Arbeitsweg	Wahl zwischen vertrauten Wegen	Zurechtfinden in einer fremden Stadt
	Führung (ca. 2 Sekunden)	Abbiegen an einer vertrauten Kreuzung	Überholen anderer Fahrzeuge	Steuern auf einer glitschigen Fahrbahn
	Stabilisierung (zwischen 100 ms und max. 300 ms)	Um eine Kurve fahren	Ein unbekanntes Auto fahren	Fahrschüler in der ersten Fahrstunde

Es existieren weitere alternative Definitionen und Unterteilungen der Aufgabenebenen beim Fahren. Parallel zu Donges (1982) hat Michon (1986) drei Level von Fahraufgaben definiert. Ein strategisches Verhalten (strategic), ein taktisches Verhalten (tactical) und ein operatives Verhalten (operational). Für operatives Verhalten wird ein Zeitraum im Millisekunden Bereich, für taktisches Verhalten ein Zeitraum von Sekunden und für strategisches Verhalten ein Zeitraum von längerer Dauer angegeben (Michon, 1986). Basierend auf psychologischen Betrachtungen wird von Tanida & Pöppel (2006) sogar ein fünfstufiges hierarchisches Model aufgestellt. Dies basiert auf den unterschiedlichen Zeitfenstern für die einzelnen Abläufe. Nach der Dauer der Interaktion werden die Level aufgeteilt in fünf Stufen, beginnend mit dem strategischen Level (Fahrplanung, Antizipieren des finalen Ziels, ...), folgend dem segmentierten taktischen Level (überprüfen der Zeit, des Ortes, der Verkehrsschilder, ...), dann dem Manöverlevel (erreichen einer Kreuzung, überholen eines Fahrzeuges, Spurhaltung, ...), dem antizipativen Kontrolllevel (steuern, beschleunigen, bremsen, ...) und zuletzt dem sensomotorischen und Wahrnehmungslevel (integrieren der Information, ...). Alle Level, mit Ausnahme des Wahrnehmungslevels, können sich dabei potentiell beeinflussen (Tanida & Pöppel, 2006). Folgendes Beispiel soll dies verdeutlichen: Wenn auf dem strategischen Level eine Änderung des Fahrtziels erfolgt, beeinflusst dies das taktische Level, da hier zum Beispiel der Ort neu bewertet werden muss. Entsprechend beeinflusst die auf dem Manöverlevel auch die Entscheidung beim Erreichen einer Kreuzung und auf dem antizipativen Kontrolllevel das Brems- und Beschleunigungsverhalten.

## 2.2 Physikalische Zusammenhänge zum Kraftstoffverbrauch im Fahrzeug

Für die Fortbewegung eines Fahrzeugs wird Energie in Form von Kraftstoff benötigt. Um den Kraftstoffverbrauch senken zu können, ist es nötig den Wirkungsgrad der Antriebsquelle und des Antriebsstrangs zu verbessern oder die Fahrwiderstände zu senken (Steinberg & Goßlau, 2015). Die Fahrwiderstände setzen sich zusammen aus dem Luftwiderstand, dem Rad- und Rollwiderstand, dem Steigungswiderstand und dem Beschleunigungswiderstand. Dies ergibt dann für den Verbrauch auf einer gefahrenen Strecke nach Repmann et al. (2013) folgende Formel:

$$B_e = \frac{\int b_e \cdot \frac{1}{\eta_{\ddot{u}}} \left[ \left( m \cdot f \cdot g \cdot \cos \beta + \frac{\rho}{2} \cdot C_w \cdot A \cdot v^2 \right) + m(a + g \cdot \sin \beta) + B_r \right] \cdot v \cdot dt}{\int v \cdot dt}$$

Strecke

Abbildung 2-3: Streckenverbrauch (nach Repmann et al., 2013)

Tabelle 2-2: Einflussgrößen auf den Streckenverbrauch

Größe	Einheit	Größe	Einheit
$B_e$ Streckenverbrauch	[g/km]	$\rho$ Dichte der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$b_e$ Spezifischer Verbrauch	[g/kWh]	$c_w$ Luftwiderstandsbeiwert	-
$\eta_{\ddot{u}}$ Übertragungswirkungsgrad des Triebstranges	-	$A$ Stirnfläche	[m <sup>2</sup> ]
$m$ Wagenmasse	[kg]	$v$ Fahrgeschwindigkeit	[m/s]
$f$ Rollwiderstandsbeiwert	-	$a$ Beschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$g$ Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]	$B_r$ Bremswiderstand	[N]
$\beta$ Steigungswinkel	[°]	$t$ Zeit	[s]

Der spezifische Verbrauch  $b_e$  des Motors wird bestimmt durch die generelle Entscheidung zwischen Otto- und Dieselmotor und seinen Konstruktionseigenschaften, zu denen die generierte Leistung, die verwendeten Motortechnologien, zum Beispiel Motoraufladung und

Direkteinspritzung gehören. Außerdem ist der spezifische Verbrauch  $b_e$  abhängig von der aktuellen Drehzahl und dem effektiven Mitteldruck im Motor. Generell gilt, dass der optimale Wirkungsgradbereich im niedrigen Motordrehzahlbereich und bei relativ hohen effektiven Mitteldrücken liegt. Der effektive Mitteldruck wird dabei direkt über die Gaspedalstellung beeinflusst. Das bedeutet, es ist optimal, wenn für eine bestimmte benötigte Leistung eine möglichst niedrige Drehzahl gewählt wird, da dadurch, um die Leistung zu erreichen, gleichzeitig der benötigte effektive Mitteldruck höher ist. Dies kann beim Fahrzeug durch die Wahl eines höheren Ganges erfolgen. Der exakte optimale spezifische Verbrauchspunkt variiert von Motor zu Motor. Diese Zusammenhänge werden üblicherweise über Verbrauchskennfelder dargestellt aus denen der optimale Betriebspunkt abgelesen werden kann (Abbildung 2-4).

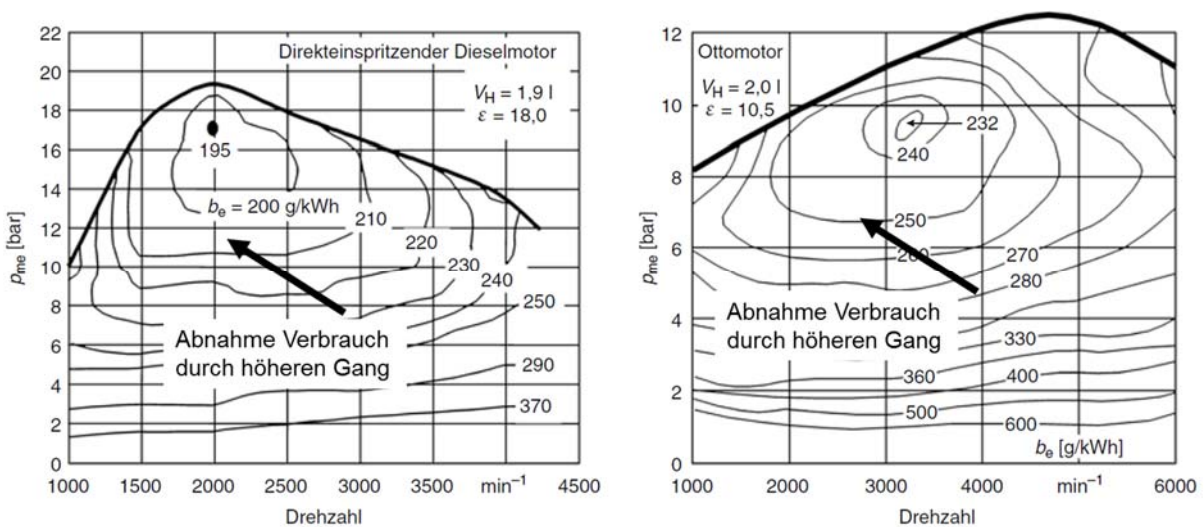


Abbildung 2-4: Typische Verbrauchskennfelder (aus: Pischinger et al., 2013) mit schematischer Darstellung beim Wechsel zu einem höheren Gang

Basierend auf den Einflussgrößen auf den Kraftstoffverbrauch, können entsprechende Optimierungspotenziale identifiziert werden. Eines der Ziele ist die Senkung der Fahrwiderstände, das andere die Optimierung des spezifischen Verbrauchs  $b_e$  des Motors. Nach Dorrer (2003) wird durch verschiedene Quellen Einfluss auf die Fahrwiderstände und den spezifischen Verbrauch genommen. Zunächst kann der Fahrzeughersteller bei der Entwicklung eines Fahrzeugmodells den Kraftstoffverbrauch verringern, indem er durch konstruktive Maßnahmen den Motor optimiert und Fahrwiderstände verringert, oder indem er leichtere und luftwiderstandsärmere Fahrzeuge konstruiert (Tabelle 2-3). Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrzeugmodellen werden durch normierte Fahrzyklen aufgezeigt. In Europa wird der Kraftstoff-

verbrauch eines Fahrzeugmodells durch den Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bestimmt. Allerdings unterschätzt der NEFZ den Verbrauch in der Praxis um bis zu 20 % (Pelkmans & Debal, 2006).

*Tabelle 2-3: Einflussfaktoren der Kraftfahrzeughersteller auf den Kraftstoffverbrauch (nach: Dorrer, 2003, S. 35)*

<b>Einflussgröße</b>	<b>Fahrzeug- und motortechnische Einflussfaktoren</b>
Rollwiderstand	Fahrzeugleergewicht, mögliche Räder- und Reifentypen
Luftwiderstand	Karosserieform und -größe, Räder- und Reifenform
Beschleunigungs- und Steigungswiderstand	Fahrzeuggewicht
Triebstrang	Kraftübertragung
Spezifischer Verbrauch	Verbrennungsverfahren, Motorbetriebsparameter und Bordenergie

Für den Fahrzeughalter und Fahrzeugnutzer gibt es vor der Fahrt ebenso Möglichkeiten den Kraftstoffverbrauch zu optimieren. Die Masse  $m$  eines Fahrzeuges kann reduziert werden, indem unnötiger Ballast aus dem Fahrzeug entfernt wird. Der Rollwiderstandsbeiwert  $f$  wird durch den Reifen beeinflusst. Wichtiger Parameter neben der Wahl eines Reifens mit konstruktiv bedingtem niedrigem Rollwiderstand ist vor allem der Luftdruck. „So kann der Rollwiderstandsbeiwert eines Pkw-Reifens um circa 25 % reduziert werden, wenn der Luftdruck um 0,5 bar angehoben wird“ (Steinberg & Goßlau, 2015). Der Luftwiderstand setzt sich zusammen aus dem Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$ , der Stirnfläche  $A$  und dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit  $v$ . Zusätzliche Aufbauten wie Dachgepäckträger erhöhen entsprechend sowohl den Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  als auch die Stirnfläche  $A$ . Ein Dachgepäckträger erhöht den Luftwiderstandsbeiwert zum Beispiel um ungefähr 20 % (Chowdhury, Alam, Khan, Djamovski & Watkins, 2012). Weiteres Optimierungspotential bietet eine regelmäßige Wartung des Fahrzeugs zum Beispiel durch ein besseres Motoröl (ca. 2 % Ersparnis nach Sivak & Schoettle, 2011). Tabelle 2-4 gibt einen Überblick über die Einflussfaktoren nach Dorrer (2003).

*Tabelle 2-4: Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch durch den Fahrzeughalter und Fahrzeugnutzer (nach: Dorrer, 2003, S. 35)*

<b>Einflussgröße</b>	<b>Fahrzeug- und motortechnische Einflussfaktoren</b>
Rollwiderstand	Zuladung, Breit- und Winterreifen, Reifenluftdruck
Luftwiderstand	Dachaufbauten (Gepäckträger), Breitreifen

<b>Einflussgröße</b>	<b>Fahrzeug- und motortechnische Einflussfaktoren</b>
Beschleunigungs- und Steigungswiderstand	Zuladung
Triebstrang	Technischer Zustand
Spezifischer Verbrauch	Motorwartung und -einstellung

Auch während der Fahrt beeinflusst der Fahrer den Verbrauch. Die Fahrweise hat sowohl Einfluss auf den spezifischen Verbrauch  $b_e$ , wie auch auf die Fahrwiderstände. Vor allem hohe Geschwindigkeiten  $v$  sollten aufgrund des quadratischen Einflusses auf den Luftwiderstand vermieden werden. Bremsungen sollten insgesamt vermieden werden, da die Bremsenergie, falls keine Rekuperationsvorrichtung vorhanden ist, direkt über Wärme an die Umwelt abgegeben wird und dadurch der Streckenverbrauch entsprechend erhöht wird. Ein wichtiger Punkt ist auch das optimale Ausnutzen des spezifischen Verbrauchs  $b_e$ . Abbildung 2-4 (S. 9) zeigt, wie niedrigere Drehzahlen durch das Fahren in einem höheren Gang den Verbrauch positiv beeinflussen. Genauso verringert sich der Kraftstoffverbrauch positiv bei vorausschauendem Fahren. Durch vorausschauendes Fahren wird gleichmäßiger gefahren, was die Anzahl an Beschleunigungen reduziert und damit den zu überwindenden Beschleunigungswiderstand. Auch wird weniger gebremst. Zusätzlich kann durch ein frühzeitiges Verzögern die Schubabschaltung des Fahrzeugs länger ausgenutzt werden. Die Schubabschaltung sorgt dafür, dass beim Ausrollen lassen mit eingelegtem Gang, kein Kraftstoff mehr in den Motor eingespritzt wird. Aber auch ein sehr langes Ausrollen im Leerlauf hat den Vorteil, dass vom Motor keine Fahrwiderstände mehr überbrückt werden müssen und kann je nach Situation effizienter sein. Dies hängt von der Dauer der Ausrollzeit ab. Bei eingelegtem Gang verzögert das Fahrzeug stärker und kann somit weniger Strecke überwinden. Unabhängig vom Fahrverhalten erhöhen auch die Benutzung von Nebenverbrauchern, wie die Klimaanlage, aufgrund der zusätzlich benötigten Energie, und offene Fenster, welche einen negativen Einfluss auf den Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  haben, den Kraftstoffverbrauch (Sivak & Schoettle, 2011). In der Formel des Streckenverbrauchs aus Abbildung 2-3 wird nur das fahrende Fahrzeug berücksichtigt. Optimierungspotential besteht aber auch beim stehenden Fahrzeug wie zum Beispiel durch die Ausnutzung der, falls vorhandenen, Start-Stopp-Automatik. Einen Überblick über die Einflussgrößen während der Fahrt gibt Tabelle 2-5.

Tabelle 2-5: Verbrauchseinfluss durch den Fahrer während der Fahrt (abgewandelt nach: Dorrer, 2003, S. 35)

<b>Einflussgröße</b>	<b>Einflussfaktoren durch Fahr- und Betriebsweise</b>
Fahrgeschwindigkeit	Geschwindigkeitswahl abhängig vom Verkehr und festgesetzten Tempolimits
Beschleunigung	Beschleunigungswahl abhängig vom Verkehr
Spezifischer Verbrauch	Schaltvorgang und Gangwahl
	Motorbetriebspunkt durch Fahrpedalbedienung Verwendung von Nebenverbrauchern, wie z. B. Klimaanlage, Sitzheizung, Licht

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Einflusskategorien wird der Kraftstoffverbrauch auch beeinflusst durch die Wahl der Fahrtroute und durch äußere Einflüsse. Bei Ericsson, Larsson & Brundell-Freij (2006) zum Beispiel waren die möglichen Ersparnisse ungefähr 8 %, wenn nicht von Anfang an die optimale Route genommen wurde. Außerdem hat die Umwelt einen Einfluss auf den Verbrauch. Das in Abbildung 2-4 gezeigte Verbrauchskennfeld ist abhängig unter anderem von der Umgebungstemperatur und dem Umgebungsdruck. Auch die Verkehrsbedingungen beeinflussen den Kraftstoffverbrauch. Ein dichter Verkehrsfluss sorgt dafür, dass unter Umständen nicht mehr die optimale Geschwindigkeit oder vorausschauend gefahren werden kann. Genauso beeinflussen Lichtsignalanlagen und die Verkehrsführung den Verbrauch.

Tabelle 2-6: Äußere Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch (aus: Dorrer, 2003)

<b>Einflussgröße</b>	<b>Einflussfaktoren durch Fahrstrecke, Umgebungsbedingungen und Verkehr</b>
Rollwiderstand	Straßenbelag, Schlaglöcher, Streckenführung (Kurven), Wetterverhältnisse
Steigungswiderstand	Streckentopographie
Geschwindigkeit	Gesetzliche Geschwindigkeitsvorgaben, Verkehrs- und Wetterverhältnisse, Kurvigkeit der Strecke
Beschleunigung	Geschwindigkeitsdynamik durch Verkehr
Strecke	Streckenführung und -länge
Spezifischer Verbrauch	Motorbetriebsbereichswahl (Geschwindigkeitsvorgaben, Verkehrsverhältnisse), absolute Höhe der Strecke, Temperatur, Witterung (Luftdichte, Sauerstoffanteil)

Der Einfluss des Fahrzeugs auf den Kraftstoffverbrauch, wie auch die Einflüsse durch Veränderungen am Fahrzeug, wie Anbauten und durch den Wartungszustand können recht

gut quantifiziert und verglichen werden. Die Einflüsse des Fahrers und durch Umweltbedingungen sind schwerer zu messen, da immer mehrere voneinander unabhängige Einflussgrößen sich verändern. Eine Übersicht welche Einflussfaktoren es auf den Kraftstoffverbrauch gibt, kann auch aus der Tabelle bei Mohra (2014, S. 25–26) entnommen werden.

Der Kraftstoffverbrauch lässt sich direkt in CO<sub>2</sub>-Emissionen umrechnen. Nach Braess, Zinke, Nettle, Fritzsche & Seiffert (2013) entspricht überschlägig berechnet ein Liter verbrannter Ottokraftstoff 2400 g CO<sub>2</sub> und ein Liter Diesel 2640 g CO<sub>2</sub>. In der offiziellen EU-Richtlinie (Europäische Kommission, 1993) wird der Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen im Prüfstand über die Abgasemissionen ermittelt.

### 2.3 Unterschiede im Kraftstoffverbrauch durch den Fahrer

Im vorherigen Kapitel wurde beschrieben, welche Faktoren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben. Der Nutzer des Fahrzeugs hat die Möglichkeit vor der Fahrt durch zum Beispiel eine optimierte Planung der Verkehrsrouten und durch Optimierung des Fahrzeugs, zum Beispiel Entfernung von Dachaufbauten und Wartung des Fahrzeugs den Verbrauch zu senken. Während der Fahrt beeinflussen Nebenverbraucher oder offene Fenster den Kraftstoffverbrauch. Aber viele Einflussgrößen auf den Kraftstoffverbrauch sind vom Verhalten des Fahrers während der Fahrt abhängig. Allerdings, wie groß ist der Einfluss des Fahrers tatsächlich beziehungsweise wie groß sind die Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrern? Die ersten Versuche dazu führten Waters & Laker (1980) durch. Dazu ließen sie zehn Fahrer auf einem Testgelände mit elf Kreuzungen, aber ohne Verkehr, eine 2,6 km lange Route je zehnmal fahren. Die Anweisung war, dabei so normal wie möglich zu fahren. Das Testfahrzeug war ein mit Messtechnik ausgestatteter Ford Escort 1300 mit warmem Motor. Es konnte dabei festgestellt werden, dass zwischen dem besten und schlechtesten Fahrer 50 % Unterschied, bezogen auf den besten Fahrer, beim verbrauchten Kraftstoff liegen. Sogar zwischen den einzelnen Durchläufen der jeweiligen Fahrer gab es einen Unterschied im Verbrauch von bis zu 14 %, obwohl es keine erkennbaren äußeren Unterschiede zwischen den einzelnen Durchläufen gab. Rumbolz (2013) kommt in seiner Studie auf ähnliche Ergebnisse wie Waters & Laker (1980). Zusätzlich zu Waters & Laker (1980) analysierte Rumbolz (2013) den Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit vom Streckentyp. Die größten Unterschiede fand er außerorts ohne Bundesstraßen, gefolgt von Fahrten in der Stadt und auf Autobahnen (Tabelle 2-7). Bei Rumbolz (2013) wie auch in der von Dorrer (2003) und Schmidt & Liebl (2001) erwähnten Befragung von BMW Kunden zeigt sich zusätzlich noch eine Asymmetrie in der Streuung der Verbrauchswerte. Diese wird erklärt



dadurch, dass ein minimaler Streckenverbrauch existiert, dem sich der Fahrer annähern kann, aber dass andererseits eine Strecke theoretisch mit beliebig hohem Maximalverbrauch befahren werden kann (Rumbolz, 2013). Auch andere Studien zeigen eine deutliche Streuung der Verbrauchswerte. Bei den meisten Studien liegt der Mehrverbrauch des schlechtesten Fahrers zwischen 50 % und 100 % abhängig vom Versuchsdesign und dem Streckentyp, da die Varianz des Kraftstoffverbrauchs nicht nur vom Fahrer abhängt. Tabelle 2-7 listet einige diesbezügliche Studien auf. Die typische asymmetrische Streuung des Kraftstoffverbrauchs über verschiedene Fahrer wird in Abbildung 2-5 gezeigt.

Tabelle 2-7: Übersicht über die vom Fahrer erzeugte Variabilität des Kraftstoffverbrauchs

Quelle	Verbrauchsdifferenz	Streckentyp	Anmerkungen
Alessandrini, Orecchini, Ortenzi & Villatico Campbell, 2009	Ca. 55 % Mehrverbrauch beim schlechtesten Fahrer	Stadt	18 Probanden im realen Stadtverkehr aber immer identischer Kurs, Hybridfahrzeug mit Automatikgetriebe
Kraxner, Brüstle & Striebich, 1997	25 % Streubreite	Landstraße	Schonende Fahrweise der Fahrer, gleiche Durchschnittsgeschwindigkeit (Variation $\pm 10$ km/h), Handschalter
Küster & Reiter, 1987	Ca. 71 % Mehrverbrauch beim schlechtesten Fahrer	Stadt	115 junge Fahranfänger, „normaler Fahrstil“, identische Kurs unter Realbedingungen
Küster & Reiter, 1987	Ca. 96 % Mehrverbrauch beim schlechtesten Fahrer	Stadt	Gleiche Versuchsbedingungen und gleiches Probandenkollektive wie beim vorherigen Eintrag, aber Anweisung „ökonomische Fahrstil“ Fahrt mit normalen Fahrstil und ökonomischen Fahrstil permutiert zwischen den Probanden
LeBlanc, Sivak & Bogard, 2010	29 % Spannweite zwischen dem 10. und 90. Perzentil der Fahrer	Gemischt	Naturalistic Driving Study mit 117 Fahrern über ca. 36 bis 43 Tagen mit 16 identisch ausgerüsteten Fahrzeugen im Südosten Michigans
Rommerskirchen, Müller & Bengler, 2012	67 % Spannweite	Stadt, Außerorts, Autobahn	30 Probanden im Fahrsimulator, mit identischen Kurs und Versuchsbedingungen, Automatikfahrzeug
Rumbolz, 2013	33 % Spannweite, 6,5 % Standardabweichung (SD)	Stadt, Außerorts, Bundesstraße, Autobahn	50 Probanden im realen Verkehr, immer identischer Rundkurs, identisches Fahrzeug, wochentags immer zur gleichen Uhrzeit gefahren, Handschalter

<b>Quelle</b>	<b>Verbrauchsdifferenz</b>	<b>Streckentyp</b>	<b>Anmerkungen</b>
Rumbolz, 2013	47 % Spannweite, 9,8 % SD	Innerorts	Wie vorheriger Eintrag, aber nur Innerortsanteile ausgewertet
Rumbolz, 2013	55 % Spannweite, 10,3 % SD	Außerorts ohne Bundesstraßen	Wie vorheriger Eintrag, aber nur Außerortsanteile ohne Bundesstraßen ausgewertet
Rumbolz, 2013	26 % Spannweite, 5,9 % SD	Bundesstraßen	Wie vorheriger Eintrag, aber nur Bundesstraßen ausgewertet
Rumbolz, 2013	45 % Spannweite, 9 % SD	Autobahn	Wie vorheriger Eintrag, aber nur Autobahnen ausgewertet
Schröder, 1984	Ca. 50% Mehrverbrauch beim schlechtesten Fahrer	Stadt	Sechs Probanden, jeweils fünf Fahrten mit unterschiedlichen Getrieben aber gleiches Fahrzeug, immer identischer Kurs unter Realbedingungen
Schröder, 1984	Ca. 70% Mehrverbrauch beim schlechtesten Fahrer	Landstraße	Sechs Probanden, jeweils fünf Fahrten mit unterschiedlichen Getrieben aber gleiches Fahrzeug, immer identischer Kurs unter Realbedingungen, Unterschied vor allem durch unterschiedliche Durchschnittsgeschwindigkeiten
Schröder, 1984	Ca. 100% Mehrverbrauch beim schlechtesten Fahrer	Autobahn	Sechs Probanden, jeweils fünf Fahrten mit unterschiedlichen Getrieben aber gleiches Fahrzeug, immer identischer Kurs unter Realbedingungen, Unterschied vor allem durch unterschiedliche Durchschnittsgeschwindigkeiten, nur kurzer Autobahnabschnitt (ca. 10 min)
Schmidt & Liebl, 2001	Ca. 65 % Mehrverbrauch bei den schlechtesten Fahrern	-	Analyse des Kraftstoffverbrauchs bei BMW 328i Kunden mit Hilfe von Befragungen
Waters & Laker, 1980	50 % Mehrverbrauch beim schlechtesten Fahrer	Stadt	10 Probanden auf Testgelände ohne Verkehr, Handschalter

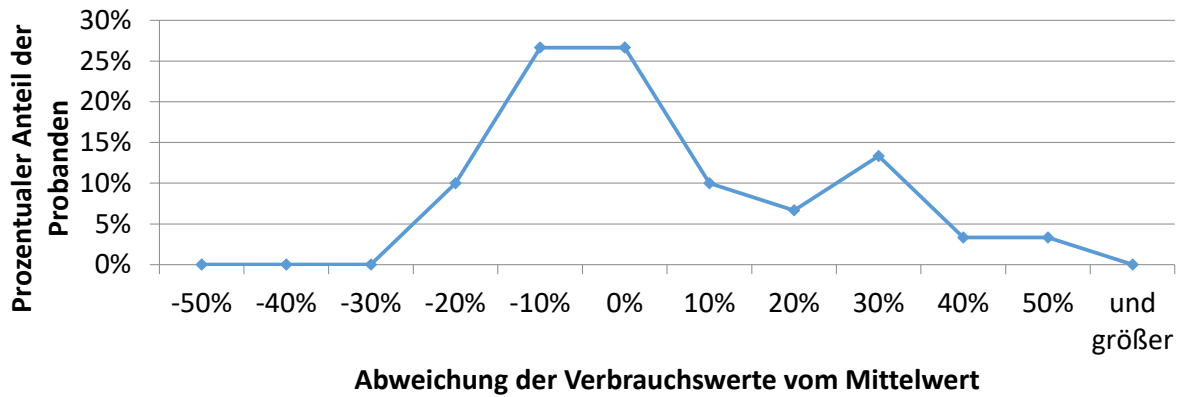


Abbildung 2-5: Typische schiefe Verteilung der Kraftstoffverbrauchswerte am Beispiel einer Fahr-simulatorstudie (Rommerskirchen et al., 2012)

Die zuvor gezeigte Tabelle 2-7, wie auch die Verteilung der Kraftstoffverbrauchswerte (Abbildung 2-5) zeigen sehr deutlich, welchen Einfluss der Fahrer auf den Kraftstoffverbrauch hat und das entsprechend ein großes Optimierungspotential vorhanden ist. Andererseits wird auch klar, dass es vom Fahrscenario abhängig ist, wie groß der Unterschied zwischen einem verbrauchsoptimalen Fahrer und einem verbrauchsschlechten Fahrer ist und entsprechend, wie viel Potential zur Verbrauchssenkung vorhanden ist. Basierend auf diesen Erkenntnissen und den in Kapitel 2.2 genannten Einflussfaktoren besteht die Frage demnach, wodurch die Unterschiede zwischen den Fahrern entstehen.

Dazu muss auch betrachtet werden, welche fahrdynamischen Parameter den größten Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben. Redsell et al. (1993) untersuchten dies, indem sie Daten von sechs Fahrern auf einer längeren Testroute erhoben. Das Ziel war, die wichtigsten fahrdynamischen Faktoren auf den Kraftstoffverbrauch zu identifizieren. Dazu wurden mit den erhobenen Daten eine Korrelationsmatrix erstellt und eine Faktorenanalyse durchgeführt. In der Stadt ist der wichtigste Einflussfaktor auf den Kraftstoffverbrauch die mittlere Geschwindigkeit. Eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit in der Stadt bedeutet einen geringeren Kraftstoffverbrauch. Auf der Landstraße überwiegt der Einfluss der Frequenz des Gangwechsels, die Fahrzeugbeschleunigung und Parameter, die die Bewegung der Drosselklappenstellung beschreiben. Auf der Autobahn führt vor allem eine höhere mittlere Fahrgeschwindigkeit zu einem höheren Verbrauch. (Redsell et al., 1993)

Basierend auf den Naturalistic Driving Study (NDS) Daten von ungefähr 45 Probanden aus dem Stadtverkehr analysierte Ericsson (2001), welche Faktoren den größten Einfluss auf den Verbrauch haben. Es handelte sich hierbei um die Faktoren langes Beschleunigen mit hoher Leistungsnachfrage und mit mittlerer Leistungsnachfrage, die Dauer von Fahrzeughalten, das

stärkere Oszillieren der Fahrgeschwindigkeit und die Dauer von extremen Beschleunigungen, welche alle bei größeren Werten einen erhöhten Kraftstoffverbrauch zur Folge haben. Je länger aber im Geschwindigkeitsbereich von 50 bis 70 km/h gefahren wird und das möglichst gleichzeitig bei niedrigen Drehzahlen im vierten Gang, desto niedriger wird der Kraftstoffverbrauch. (Ericsson, 2001)

Birrell, Taylor, McGordon, Son & Jennings (2014b) untersuchten die Verbrauchswerte aus den Baselinefahrten dreier unterschiedlicher Studien. Das Hauptziel war, zu untersuchen welche Fahrparameter den Kraftstoffverbrauch am stärksten beeinflussten. Die Daten wurden mit verschiedenen Analysemethoden ausgewertet. Es wurde eine multiple lineare Regression und eine generelle lineare Regression durchgeführt, wie auch ein neuronales Netz und ein CHAID Algorithmus aufgebaut. Die Regressionsmodelle gewichten den Einfluss der Standardabweichung der Geschwindigkeit am höchsten, während für das neuronale Netz und für den CHAID Algorithmus die mittlere Gaspedalstellung der wichtigste Einflussfaktor auf den Kraftstoffverbrauch ist. Zusätzliche wichtige Einflussparameter sind unter anderem die mittlere und die maximale Motordrehzahl, die maximale Beschleunigung und die maximale Verzögerung. (Birrell et al., 2014b)

Die verschiedenen Studien zeigen leichte Unterschiede, welche Fahrverhaltensunterschiede einen großen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben (Tabelle 2-8). Bei diesen Parametern spielen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Fahrern eine große Rolle in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch und entsprechend sollten diese bei der Betrachtung kompletter Fahrten optimiert werden. Dabei spielt zusammenfassend über alle Studien eine möglichst gleichmäßige Geschwindigkeit und weniger die absolute Geschwindigkeit mit Ausnahme von hohen Fahrgeschwindigkeiten auf der Autobahn eine wichtige Rolle. Genauso ist gleichmäßigeres Beschleunigen unter Vermeidung sehr hoher Beschleunigungen wichtig, wie auch die Wahl des Ganges bei Fahrzeugen mit manuellen Getriebe. Entsprechend lauten die Empfehlungen für verbrauchsarmes Fahren:

- Gleichmäßiges und vorausschauendes Fahren unter Vermeidung unnötiger Beschleunigungen und Bremsungen
- Vermeidung sehr starker Beschleunigungen und Bremsungen
- Wahl eines möglichst hohen Ganges, frühes Schalten in den nächsthöheren Gang
- Vor allem auf Autobahnen, hohe Geschwindigkeiten vermeiden

Ähnliche Empfehlungen finden sich zum Beispiel auch bei Dorrer (2003), Barkenbus (2010), Young, Birrell & Stanton (2011) und Schall & Mohnen (2015) oder auch als Anleitungen für den Fahrer in Veröffentlichungen von Verkehrsclubs (z.B. ADAC, 2017) oder Behörden (z.B. Umweltbundesamt, 2008).

*Tabelle 2-8: Wichtigste Einflussparameter des Fahrverhaltens auf den Kraftstoffverbrauch basierend auf verschiedenen Studien*

Quelle	Wichtigste Einflussparameter
Redsell et al., 1993	Stadt: höhere Geschwindigkeit führt zu niedrigerem Kraftstoffverbrauch Außerorts: Frequenz des Gangwechsels, Beschleunigung und Bewegung der Drosselklappenstellung Autobahn: höhere Geschwindigkeit führt zu höherem Kraftstoffverbrauch
Ericsson, 2001	Nur Stadt: Längeres beschleunigen mit hoher und mittlerer Leistungsnachfrage, Dauer von Fahrzeughalten, starkes Oszillieren der Fahrgeschwindigkeit und die Dauer von extremen Beschleunigungen erhöhen den Kraftstoffverbrauch. Längeres Fahren in niedrigem Gang bei Geschwindigkeiten von 50 bis 70 km/h führen zu einer Senkung des Verbrauchs
Birrell et al., 2014b	Aus Regressionsanalysen (Multiple und allgemein lineare Modelle): 1. Standardabweichung der Geschwindigkeit, 2. Mittlere Motordrehzahl, 3. Maximale Verzögerung Aus neuronalen Netzen: 1. Mittlere Gaspedalstellung, 2. Maximale Beschleunigung, 3. Standardabweichung der Geschwindigkeit Aus CHAID Algorithmus: 1. Mittlere Gaspedalstellung, 2. Standardabweichung der Geschwindigkeit, 3. Maximale Motordrehzahl

Die Unterschiede im Fahrverhalten zwischen verschiedenen Fahrten und Fahrern wird häufig dadurch erklärt, dass mal mehr oder weniger „aggressiv“ oder „sportlich“ gefahren wird. Aggressives Fahren wird von Vlieger (1997) als plötzliche Beschleunigung und starkes Bremsen, von Ericsson (2001) als plötzliche und hohe Beschleunigung und starkes Bremsen oder von Carlson, Lohse-Busch & Douba (2011) als höhere Geschwindigkeit und Beschleunigung definiert. Dabei wird bei Vlieger (1997) sportlich mit aggressiv gleichgestellt. Bei Mierlo, Maggetto, Burgwal & Gense (2004) ist sportlich das Gegenteil von ökonomischem Fahren, bei Dorrer (2003) das Ausnutzen des Beschleunigungspotentials mit Fahren bei hohen Drehzahlen. Das heißt die Begriffe aggressiv und sportlich werden über das Fahrverhalten definiert, ohne Betrachtung des mentalen Modells des Fahrers, also ob er tatsächlich den Wunsch hat, genauso zu Fahren. Einzige Ausnahme sind Gonder, Earleywine & Sparks (2012), die aggressives Fahren als das Verhalten definieren, wie der Fahrer sich verhalten würde, wenn er zu spät ankommen würde bei trotzdem sicherer Fahrweise. Der Kraftstoffverbrauch ist bei aggressiven Fahren mit

30 % bis 40 % höher (Vlieger, 1997; Vlieger, Keukeleere & Kretzschmar, 2000) oder um 25 % bis 60 % höher bei sportlicher Fahrweise im Gegensatz zur normalen Fahrweise (Dorrer, 2003, S. 72). Bei Gonder et al. (2012) ist der Verbrauch im Vergleich zu einer ökologischen Fahrt um ca. 30 % höher.

Ökologisches Fahren beeinflusst andere Aspekte, wie Zeitbedarf, Sicherheit und Komfort beim Fahren. Der Zeitbedarf ist allgemein bei kraftstoffsparender Fahrweise höher, vor allem wenn dies durch eine generell niedrigere Fahrgeschwindigkeit erreicht wird. Allerdings kann auch Kraftstoff gespart werden, ohne die Fahrtzeit zu verlängern, wenn der Fahrer Lichtsignalanlagen oder Stopps antizipieren kann (Evans, 1979). Darum kann mit geringerem Zeitaufwand deutlich mehr Kraftstoff eingespart werden. Zum Beispiel konnte bei Rommerskirchen, Helmbrecht & Bengler (2014) der Kraftstoffverbrauch um ca. 10 % verringert werden, bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Fahrzeit um nur 4 %. In vielen Fällen korreliert sicheres und ökologisches Fahren miteinander, da in beiden Fällen der Wunsch nach weniger aggressiven Fahren und geringeren Geschwindigkeiten, welches Unfälle verhindert, im Vordergrund steht (Jenness, Singer, Walrath & Lubar, 2009; Young et al., 2011). Auch bedeutet ein vorausschauenderes Fahren, dass man sich auf Situationen früher einstellen kann, was sowohl der Sicherheit als auch dem Kraftstoffverbrauch zuträglich ist (Popiv, 2012). Dies führt auch zu größeren Abständen zu vorausfahrenden Fahrzeugen (Birrell, Fowkes & Jennings, 2014a). Allerdings kann ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung von ökologischen Fahren unter Umständen die Ablenkung erhöhen (Young et al., 2011). Als Gefahr wird von Rakotonirainy, Haworth, Saint Pierre & Delhomme (2011) gesehen, dass es durch den Wunsch Bremsungen zu vermeiden, zu erhöhten Geschwindigkeiten in manchen Situationen kommen könnte. Außerdem könnte es, durch das frühzeitige Ausrollen, auf das der Nachfolgende nicht vorbereitet ist, zu Unfällen mit dem nachfolgenden Verkehr kommen (Rakotonirainy et al., 2011). Hülsebusch, Salfeld, Ponomarev & Gauterin (2013) konnten zeigen, dass sowohl der minimale, als auch der mittlere Abstand des nachfolgenden Verkehrs zum eigenen Fahrzeug in Verzögerungssituationen geringer wurde, wenn ökologische Fahrstrategien angewandt werden. Der Einfluss auf den Gesamtverkehrsfluss ist nicht so eindeutig. Dies hängt vor allem ab wie viele Fahrzeuge ökologisch fahren. Bei einheitlichem ökologischem Fahren aller Verkehrsteilnehmer wird aber auch in Verkehrsflusssimulationen von positiven Kraftstoffverbräuchen für das Gesamtsystem ausgegangen (Qian & Chung, 2011). Durch generell niedrigere Beschleunigungen und Verzögerungen und

vor allem der Vermeidung starker Bremsungen verringert sich nicht nur der Kraftstoffverbrauch sondern dies sorgt auch für einen Komfortgewinn bei den Fahrzeuginsassen (Popiv, 2012).

## 2.4 Möglichkeiten des Fahrers zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs

Wie gezeigt, sind die Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zwischen verschiedenen Fahrern sehr groß. Um verbrauchsgünstig zu fahren muss der Fahrer aber wissen, wie dies geht, es wollen und es auch situativ durchführen können (Küster & Reiter, 1987). Dorrer (2003, S. 54–55) beschreibt die Kategorien folgendermaßen:

**Wissen:** Prinzipielles und fahrsituatives Wissen, wie verbrauchsgünstig gefahren wird

**Wollen:** Akzeptanz und Interesse für eine verbrauchsgünstige Fahr- und Betriebsweise

**Können:** Möglichkeit zur Aneignung entsprechender Verhaltensmuster in Aus- und Weiterbildung und Spielraum zum Praktizieren im Straßenverkehr

Um eine verbrauchsgünstige Fahrweise zu unterstützen, müssen darum entsprechend die in Abbildung 2-6 genannten Punkte berücksichtigt werden.



Abbildung 2-6: Bestimmungssystem für eine verbrauchsgünstige Fahrweise (Dorrer, 2003, S. 55)

Generell gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Verbesserung des individuellen Kraftstoffverbrauchs. Sie zeichnen sich alle dadurch aus, dass sie einen oder mehrere Punkte des

Könnens, Wissens und Wollens ansprechen. Dies können Eco-Trainings, Ansätze zur Motivation des Fahrers oder Fahrerassistenzsysteme sein. Im Folgenden werden Potentiale, Beispiele und aktuelle Ansätze zu Training, Motivation und Fahrerassistenz aufgeführt.

**Training:**

Eco-Trainings sind eine Möglichkeit Kraftstoff einzusparen. Ziel ist vor allem das Wissen um das verbrauchsgünstige Fahren und die Motivation dieses zu tun zu erhöhen, aber auch das fahrerische Können zu verbessern, um in bestimmten Situationen automatisch verbrauchsgünstiger zu fahren. Anbieter solcher Trainings sind meistens entweder spezialisierte Dienstleister oder Automobilclubs (z.B. ADAC, 2015). Im Normalfall bekommt ein Fahrer, der bei einem Eco-Training teilnimmt zuerst eine theoretische Schulung und dann eine Praxisfahrt. Während oder nach dieser Fahrt weist ein Trainer den Teilnehmer auf mögliche Verbesserungen hin. Im Idealfall findet vor dem Training noch eine Vergleichsfahrt statt, um die positiven Effekte aufzuzeigen und um den Fahrer noch zusätzlich zu motivieren. Eco-Trainings zielen vor allem darauf ab das **Wissen** zu erhöhen, sie sollen aber auch motivieren (**Wollen**), wie auch das **Können** erhöhen indem bestimmte Situationen eingeübt werden. Barkenbus (2010) geht basierend auf den Daten des International Transport Forums (2007) davon aus, dass sich dadurch seiner Ansicht nach konservativ betrachtet langfristig ca. 5 % Kraftstoffeinsparungen erreichen lassen. Dies wird zwar zuerst in der Langzeitstudie von Beusen et al. (2009) in ihrer Veröffentlichung bestätigt. Aber bei genauerer Betrachtung waren diese Kraftstoffeinsparungen nicht permanent auf das Fahrverhalten zurückzuführen (Degraeuwe & Beusen, 2013). Es zeigt sich, dass eine kontinuierliche Verringerung der erzielten Kraftstoffeinsparungen im Laufe von sechs Monaten nach dem Trainingszeitpunkt, erfolgt. Das bedeutet, dass keine Veränderung im Kraftstoffverbrauch im Vergleich des Zeitpunktes direkt vor dem Eco-Training zum Zeitpunkt sechs Monate nach dem Eco-Training nachweisbar ist (Degraeuwe & Beusen, 2013). Es sind somit kurzfristige Effekte durch Training nachweisbar, diese sind aber zeitlich nicht anhaltend und damit nicht nachhaltig.

**Motivation:**

Für einen verbesserten Kraftstoffverbrauch ist es wichtig, dies auch zu **wollen**. **Wollen** bedeutet in diesem Zusammenhang, die Motivation zu besitzen, dies zu tun. Dass allein die Motivation einen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat, konnte Evans (1979) in verschiedenen von ihm betrachteten Studien zeigen. Der reine Hinweis mit der Anweisung ökonomisch zu fahren, brachte eine Reduktion von ca. 10 % des Kraftstoffverbrauchs vor allem auf Kosten



der Fahrdauer. Dies bedeutet, dass die Probanden Kraftstoff mit Hilfe einer verringerten Durchschnittsgeschwindigkeit eingespart haben.

Nach Barbuto & Scholl (1998) gibt es fünf Quellen der Motivation. Definiert werden zwei intrinsische Quellen, die interne Prozessmotivation und das interne Selbstverständnis, sowie die extrinsischen Quellen der instrumentellen Motivation, dem externen Selbstverständnis und der Internalisierung von Zielen. Die Motivation verbrauchsgünstig zu fahren kann entsprechend beeinflusst werden. Die intrinsische Motivation Kraftstoffkosten einzusparen ist bei vielen Fahrern vorhanden. In einer Befragung der Motivation beim Autofahren von 23 Probanden mit einer Skala von 0 (unwichtig) bis 5 (extrem wichtig) wird die Motivation Kraftstoffkosten einzusparen mit im Mittel 3,4 angegeben (Jeness et al., 2009). Bei elf Fahrern von Hybridfahrzeugen in der gleichen Studie wird die Motivation sogar im Durchschnitt als wichtig bezeichnet (Durchschnittsbewertung: 4,0). Ein negativer Einfluss der Motivation ist zum Beispiel der Zeitdruck, unter dem der Fahrer gefühlt steht. Unter Zeitdruck wird der Zeitaufwand gegenüber dem Ziel der Verringerung des Kraftstoffkosten priorisiert (Dogan, Steg & Delhomme, 2011). Im Allgemeinen wird die Sicherheit und existierender Zeitdruck immer über den Kraftstoffverbrauch gestellt (Dogan et al., 2011). Andererseits hat nach Boriboonsomsin, Vu & Barth (2010) der Kraftstoffpreis einen hohen Einfluss auf den Wunsch den Fahrstil zu ändern, um den Verbrauch zu senken. Bis zu 95 % der 20 Studienteilnehmer würden, sobald der Kraftstoffpreis eine gewisse Schwelle überschreitet ihren Fahrstil ändern wollen. Schall & Mohnen (2015) zeigen, dass durch rein finanzielle Anreize oder durch nicht-monetäre Belohnung mit Hilfe von Gutscheinen (instrumentelle Motivation) der Verbrauch bei Flottenfahrern um 3,5 % bis 5 % in einer Naturalistic Driving Study (NDS) über sechs Monate im Vergleich zum vorangegangenen Zeitraum gesenkt werden kann. Der Effekt der nicht-monetären Belohnung auf die Verbrauchseinsparungen ist dabei größer als der, der durch eine reine Geldvergütung erzielt wurde. Barkenbus (2010) will die Motivation durch verschiedene Initiativen wie bessere Ausbildung, Regulierungen, steuerlichen Anreizen und der Verstärkung gewünschter sozialer Normen erhöhen.

Ein anderer Ansatz ist, durch Gamification den Kraftstoffverbrauch zu senken. Gamification wird definiert als die Nutzung von Spieldesignelementen im nicht-Spiele Kontext (Deterding, Khaled, Nacke & Dixon, 2011). Das kann die Vergabe von Punkten für kooperativeres Fahren und das Erreichen eines Ziels in einer gewissen Zeitspanne sein, mit Hilfe von Anzeigen, wie bei Lütteken, Zimmermann & Bengler, 2016. Allein schon Anzeigen über den aktuellen und den vergangenen Kraftstoffverbrauch verleiteten Fahrer dazu, dies als Spiel zu sehen und zu

versuchen den Kraftstoffverbrauch zu verringern (Froehlich, 2014). Auch Human-Maschine-Interfaces (HMI), wie beim Elektrofahrzeug Nissan Leaf von 2010, bei denen bei ökologischer Fahrweise virtuelle Bäume entstehen führen dazu, dass sich ökologisches Fahren inklusive der virtuellen Bäume, vergleichbar wird zu einem „Tamagotchi“ ähnlichem Spiel (Makower, 2012). Wissenschaftliche Untersuchungen, welche Effekte speziell diese Anzeigen auf das Fahrverhalten und den Kraftstoffverbrauch hat, sind kaum vorhanden (Froehlich, 2014). Einer der wenigen Studien wurde von Kurani, Stillwater, Jones & Caperello (2013) durchgeführt. Es wurde untersucht, ob Anzeigen mit oder ohne Ecorating zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs führen. Dabei konnte eine durchschnittliche Kraftstoffeinsparung über alle Anzeigevarianten von 2,7 % erreicht werden. Motivationsaspekte wurden dabei aber nicht untersucht. Die Ausgestaltung der Anzeige ist aber wichtig, um die Motivation zu erhöhen. Nach Stillwater & Kurani (2013) ist es wichtig Ziele einzuführen. Eine Anzeige mit Hilfe derer sich der Nutzer persönliche Ziele setzen kann, motiviert diesen, stärker ökologisch zu Fahren. Eine Studie, die speziell mit Hilfe von Gamification und einer Anzeige zur Fahrunterstützung den Kraftstoffverbrauch zwischen 7,38 % und 9,66 % senken konnte, wurde von Corcoba Magaña & Muñoz-Organero (2015) durchgeführt. Mit Hilfe eines Punktesystems konnten sich verschiedene Fahrer über einen längeren Zeitraum vergleichen. Durch ökologisches Fahrverhalten konnten die Probanden Punkte erzielen. Falls sie sich nicht ökologisch verhielten, wurden ihnen Tipps zur Verbesserung ihres Fahrverhaltens gegeben. Das Ergebnis war ein über den Zeitraum kontinuierlich verringerter Kraftstoffverbrauch (Corcoba Magaña & Muñoz-Organero, 2015). Der größte ausgewertete Gamification-Ansatz zum ökologischen Fahren ist das vom Fiat-Konzern entwickelte Fiat eco:Drive, welches für viele Modelle des Konzerns verfügbar ist (Fiat Group Automobiles S.p.A., 2010). Bei dem System von Fiat werden die Fahrzeugdaten mit einem USB-Stick aufgezeichnet und danach am PC ausgewertet. Basierend auf dem Fahrverhalten wird eine Punktzahl in verschiedenen Fahrkategorien vergeben. Der Fahrer kann basierend auf den Daten seinen Fortschritt nachverfolgen und auch die gesamten erzielten Einsparungen aller Nutzer sehen und auch Verbesserungstipps für sein eigenes Fahrverhalten bekommen. Nutzer können sich außerdem selbst Verbesserungsziele setzen. Eine entsprechende Auswertung über einen Zeitraum von den ersten 30 Tagen jedes teilnehmenden Fahrers, konnte zeigen, dass im Schnitt von den Fahrern 6 % Kraftstoff am Ende dieses Zeitraums eingespart werden konnten (Fiat Group Automobiles S.p.A., 2010).

**Fahrerassistenz:**

Laut dem Deutschen Verkehrssicherheitsrat sind Fahrerassistenzsysteme, „Systeme, die geeignet sind, den Fahrer in seiner Fahraufgabe hinsichtlich Wahrnehmung, Fahrplanung und Bedienung zu unterstützen - sie wirken damit bei der Navigation, der Fahrzeugführung und der Fahrzeugstabilisierung...“ (Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR), 2006). Der Fokus der weiteren Definition liegt auf der Vermeidung und Verminderung von Unfällen. Nach weiteren Ausführungen von Bubb & Bengler (2015) sollen Fahrerassistenzsysteme auch den Komfort und die Effizienz verbessern. Somit soll durch Fahrerassistenzsysteme die allgemeine Effizienz der Mobilität erhöht werden (Bengler et al., 2014). Im Zusammenhang mit der Definition des Wissens, Wollens und Könnens bedeutet dies, dass ein Fahrerassistenzsystem sowohl das fahr-situationsbezogene **Wissen**, als auch das **Können** durch eine Vereinfachung der Fahraufgabe oder mit zusätzlichen Informationen unterstützen. Ein Nebenaspekt soll sein, dass auch die Motivation (**Wollen**) erhöht wird. Eine Möglichkeit der Klassifizierung von Systemen zur Fahrerunterstützung kann durch den Zeitpunkt der Fahrerunterstützung erfolgen (Hof et al., 2014). Eine Unterstützung kann vor der Fahrt (z. B. Auswahl der besten Eco-Route, Einsparungen je nach Studie zwischen 0,35 % und 42 % (Alam & McNabola, 2014)), während der Fahrt (z.B. Gangwahlassistenz) und nach der Fahrt (z. B. Anzeigen von Einsparpotentialen nach der Fahrt) erfolgen. Da der Fokus auf direkte Unterstützung der Fahrt liegt, werden auch nur solche Assistenzsysteme betrachtet. Generell adressieren Fahrerassistenzsystemen zur Kraftstoffeinsparungen einen oder mehrere der Punkte des Fahrerverhaltens. Dies sind vorausschauendes Fahren, Beschleunigen, Bremsen und die richtige Gangwahl. Verschiedene Klassifizierungsansätze von Fahrerassistenzsystemen zur Verbrauchsoptimierung nach „Anzeigeklassen“, Sinnesqualität, Informationsinhalt, Darstellungsform und -ort finden sich bei Mohra (2014, 28 ff.). In den Anzeigeklassen werden die Systeme unterteilt in Tachometer, Drehzahlmesser, Beschleunigungsanzeige, Verbrauchsanzeige, Ökonometer, Schaltanzeige, Schalt- und Verbrauchsanzeige, aktives Gaspedal, Verbrauchsassistenzsystem und Fahrweisenauswertung nach der Fahrt (Mohra, 2014). Wie vorher schon erwähnt, wird die Fahrweisenauswertung nach der Fahrt nicht weiter betrachtet. Tachometer, Drehzahlmesser und Beschleunigungsanzeigen mit Anzeigekomponenten zur Verbrauchsoptimierung betonen grafisch die Bereiche der optimalen Geschwindigkeit, Drehzahl und Beschleunigung bzw. die Bereiche mit deutlich erhöhtem Kraftstoffverbrauch.

Teilweise wurden Assistenzsysteme schon im Abschnitt Motivation behandelt, wenn der Fokus auf die Erhöhung der Motivation zur Kraftstoffeinsparung oder allgemein effizienterem Fahren liegt. Mohra (2014) bezeichnet diese Systeme zum Teil als „Ökonometer“, wenn diese den Fahrer bewerten oder stuft diese als Verbrauchsassistenzsystem ein. Bei der Umsetzung dieser Systeme wird, auf einer Darstellung der Information die motivierend und unter Umständen auch spielerisch funktioniert, Wert gelegt. Diese zielt darauf ab, den Fahrer zu motivieren, weniger stark zu beschleunigen und zu bremsen. Handlungsanweisungen beziehungsweise -empfehlungen werden dabei nicht situationsbezogen, sondern generell für die Fahrt gegeben. Dies kann die Empfehlung sein, generell weniger stark zu beschleunigen oder weniger stark zu bremsen.

Die Gangwahl- oder Schaltpunktanzeige hat es als bislang einziges Fahrerassistenzsystemanzeige zur Kraftstoffverbrauchsreduzierung in die europäischen Fahrzeugzulassungsvorschriften geschafft (Europäische Kommission, 2012). Alle neuen Fahrzeugmodelle müssen einen Hinweis anzeigen, ab wann idealerweise in einen höheren Gang geschaltet werden soll, um so hohe Drehzahlen durch den Fahrer zu vermeiden. Der Nutzen der Gangwahlanzeige ist fraglich. Einerseits konnten Hari, Brace, Vagg, Poxon & Ash (2012) zeigen, dass bei ihrem ökologischem Unterstützungstool, welches eine Schaltpunktanzeige beinhaltet, der Kraftstoffverbrauch um 7,6 % gesenkt werden kann. Andererseits reicht laut den Ergebnissen der Realfahrstudie von Lange et al. (2010) eine rein optische Anzeige nicht aus, um signifikante Verbrauchseinsparungen zu erzielen. In Kombination der optischen Anzeige mit einer haptischen Unterstützung verringert sich der Verbrauch aber signifikant um ca. 8 % (Lange et al., 2010). Bei Birrell et al. (2014a) reicht die optische Anzeige allerdings aus, um den Kraftstoffverbrauch um 4,1 % zu senken. Sowohl bei Birrell et al. (2014a) als auch bei Lange et al. (2010) ist die längere Nutzung des höchsten Ganges der Grund für den reduzierten Verbrauch. Zu einem anderen Ergebnis kommen Radlmayr, Selzer, Arcati & Bengler (2015), die in einer Realfahrstudie mit einem Kleinwagen Unterschiede im Fahrverhalten zwischen den drei Fällen nicht-assistiertem Fahren, optischer Unterstützung und haptisch zusammen mit optischer Unterstützung feststellen können. Der höchste Gang wird länger genutzt, aber dies hat keinen signifikanten Effekt auf den Kraftstoffverbrauch, der sich nicht signifikant ändert gegenüber der Fahrt ohne Unterstützung (Radlmayr et al., 2015).

Des Weiteren existieren eine Vielzahl von Assistenzsystemen, die sich nach Mohra (2014) nicht eindeutig zuordnen lassen. Diese werden von ihm als Verbrauchsassistenzsysteme

bezeichnet. Darunter fallen unter anderem Systeme, die situationsbezogen den Fahrer unterstützen, als auch Systeme die über Verbrauchswerte informieren oder sogar in das Fahrgeschehen eingreifen (Mohra, 2014).

Ein Assistenzsystem, das in das Fahrgeschehen eingreift, ist zum Beispiel das Adaptive Cruise Control (ACC). Die Nutzung eines ACCs sorgt für eine gleichmäßigere Fahrt. Dadurch lässt sich laut den Daten der euroFOT-Studie im Schnitt 2,8 % Kraftstoff einsparen (Faber et al., 2012). Optimierte ACC-Systeme, die stärker auf ein Ausrollen anstelle von Bremsen setzen, haben das Potential noch mehr Kraftstoff einzusparen (Flehmg, Kästner, Knödler & Knoop, 2015).

Systeme, die situationsbezogen unterstützen, basieren entweder auf dem aktuellen Fahrerverhalten um Empfehlungen zu geben, wie weniger Gas zu geben oder sie versuchen die kommenden Fahrsituationen zu präzisieren. Auf diese vorausschauenden Fahrerassistenzsysteme, soll im folgenden Kapitel eingegangen wird.

## 3 Das vorausschauende Fahrerassistenzsystem

Vorausschauend oder antizipativ bedeutet, das zukünftige Zustände und Erkenntnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit korrekt erwartet werden (Popiv, 2012). Im Straßenverkehr bedeutet Antizipation die korrekte Vorhersage zukünftiger Verkehrssituationen und Verhalten von anderen Verkehrsteilnehmern basierend auf vergangenem Wissen und dem was aktuell wahrgenommen werden kann (Popiv, 2012).

### 3.1 Antizipatives Fahren

„Vorausschauen ist der Schlüssel für sicheres, komfortables und auch verbrauchsgünstiges Fahren“ (Nöcker, Mezger & Kerner, 2005). Eine Erhöhung des Vorausschauhorizonts sorgt dementsprechend für mehr Sicherheit, Komfort, Verkehrsfluss und geringeren Kraftstoffverbrauch (Popiv, 2012; Stahl, Donmez & Jamieson, 2013). Die Vorausschau wird im aktuellen Verkehrsgeschehen begrenzt durch die Fahrzeugsensorik und durch den Menschen. Die Reichweite der Sensoren im Fahrzeug wird bestimmt durch die eingesetzte Technik und durch Umgebungsbedingungen. Heutige Radarsensoren haben zum Beispiel Reichweiten bis zu 250 m (Winner, 2015). Kuppen und Kurven begrenzen die Sensorreichweite unter Umständen zusätzlich. Fahrzeuggebundene Sensorsysteme besitzen deshalb dieselben Einschränkungen der Sicht wie der Fahrer (Laquai, 2014). Auch der Fahrer ist in seiner Vorausschau eingeschränkt. Typischerweise blickt der Fahrer standardmäßig nur 2 s (dies entspricht 28 m bei 50 km/h und 72 m bei 130 km/h) auf der Straße voraus, obwohl er auch immer wieder weiter in die Ferne blickt (Popiv et al., 2009). Mit Hilfe von aktuellem digitalem Kartenmaterial und Kommunikation zwischen Fahrzeugen (Car2Car) und Infrastruktur (Car2X) ist es möglich, die Grenzen der Fahrzeugsensorik zu erweitern und mithilfe dieser Informationen einen Vorteil zu erzielen, indem früher gehandelt wird (Abbildung 3-1). Situationen, die dadurch früher erkannt werden können, sind zum Beispiel Geschwindigkeitsbegrenzungen, Kreuzungen, der Status von Lichtsignalanlagen, scharfe Kurven, Pannenfahrzeuge, Baustellen etc. Eine frühere Handlung, also ein vorausschauendes Fahren sorgt für höhere Effizienz, Komfort und Sicherheit beim Fahren (Popiv, 2012; Stahl, Donmez & Jamieson, 2014a). Aber dazu ist vom Fahrer, wenn das Fahrerassistenzsystem rein informativ ist, eine Antizipation und ein entsprechendes Handeln erforderlich.

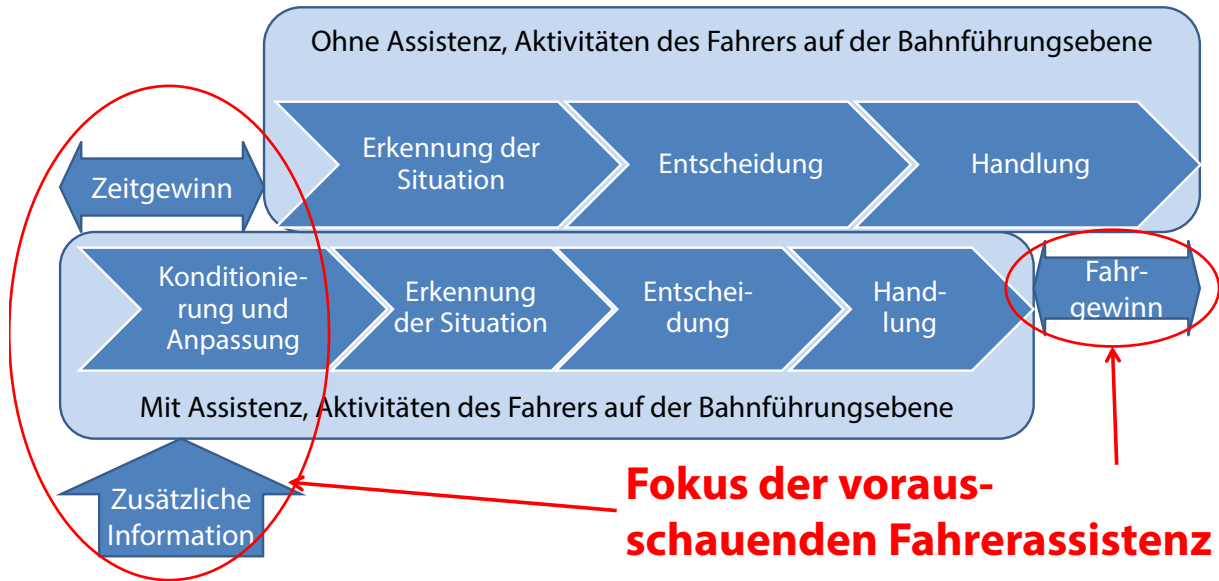


Abbildung 3-1: Vorteil des vorausschauenden Fahrens (aus: Popiv, 2012; nach Nöcker et al., 2005)

Antizipation bedeutet, dass zukünftige Zustände und Erkenntnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit korrekt erwartet werden (Popiv, 2012). Antizipatorische Fähigkeiten beim Fahren bedeuten, „dass Veränderungen vorausszusehen und momentane Zustände entsprechend fortzuschreiben sind“ (Deuschle, 2005). Basierend darauf definiert Sommer (2013, S. 26), dass „die **Antizipationsleistung im Straßenverkehr** im Folgenden als Kompetenz verstanden wird, auf der Grundlage von Wissen und aktueller Wahrnehmung zukünftige Verkehrssituationen (und damit auch das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer) richtig einschätzen zu können“. „Das vorausschauende Fahren definiert sich über das Verhalten des Fahrers“ (Sommer, 2013, S. 55). Zum vorausschauenden Handeln sind dafür vier aufeinander aufbauende Stufen der Informationsverarbeitung notwendig. Diese vier Stufen sind nach Sommer (2013) in der folgenden Reihenfolge, die sensorische Wahrnehmung der relevanten Stimuli, die kognitive Verarbeitung, die Antizipation der bevorstehenden Situationsentwicklung und zuletzt die Handlungsintention oder Entscheidung (Abbildung 3-2).

Entsprechend ist deshalb die „Wahrnehmung des antizipationsrelevanten Merkmals“ (Sommer, 2013), wie zum Beispiel eine rote Lichtsignalanlage oder ein Verkehrszeichen, nötig. Darum muss für eine Antizipation durch den Fahrer das Vorfeld kontinuierlich beobachtet werden (Bubb et al., 2015). Dabei erfolgt die Wahrnehmung vor allem über den visuellen Kanal (Rauch, 2009). Der visuelle Kanal muss dabei nicht nur Objekte erkennen, sondern auch die Position im Raum und deren Bewegungen. Einschränkungen sind dann zu erwarten, wenn an-

tizipationsrelevante Objekte verdeckt sind, im peripheren Sichtfeld liegen oder die Geschwindigkeit nicht bestimmt werden kann. Entsprechende Einschränkungen wirken sich auf die Antizipationsleistung aus. Aber eine reine Wahrnehmung bedeutet noch keine korrekte Antizipation der Situation, denn „die **sensorische Wahrnehmung** der relevanten Merkmale ist eine zwar notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzung für eine korrekte **Antizipation**“ (Sommer, 2013, S. 234).

Des Weiteren wird für ein antizipatives Fahren eine kognitive Kompetenz benötigt, welche es erlaubt, basierend auf der aktuellen Wahrnehmung des Verkehrszustandes, den zukünftigen Zustand zu präzisieren (Stahl et al., 2013). Darum wird für antizipatives Fahren, ein Basiswissen von stereotypischen Situationen benötigt (Stahl et al., 2013). Auch wird dem Fahrer für eine Antizipation eine hohe kognitive Kompetenz abverlangt (Stahl, Donmez & Jamieson, 2014b). Zusätzlich wird die Antizipationsleistung durch externe und interne Einflussfaktoren beeinflusst. Zu den externen Faktoren gehören die Merkmale Anzahl, Komplexität und Dynamik der Fahrumgebung, sowie technische Einschränkungen des genutzten Fahrzeugs (Sommer, 2013). Interne Faktoren sind vom Fahrer abhängige Größen. Es gibt sowohl situative Größen, wie Müdigkeit und Ablenkung, als auch andauernde, wie die Fahrpraxis. Motivationslage und Strategien der Entscheidungsfindung können weitere interne Einflussfaktoren auf die Antizipationsleistung sein (Sommer, 2013). Das bedeutet auch, dass Antizipation erlernt wird und werden kann. Dementsprechend sind erfahrene Fahrer besser in der Lage Situationen zu antizipieren (Jackson, Chapman & Crundall, 2009; Garay-Vega & Fisher, 2005). Dies wird an den Ergebnissen von Sommer (2013) deutlich, nach denen sie empfiehlt, speziell Fahranfängern eine stärkere Unterstützung zum vorausschauenden Fahren zukommen zu lassen. Abbildung 3-2 zeigt die Einflussfaktoren auf die vier Stufen der Informationsverarbeitung beim vorausschauenden Fahren.



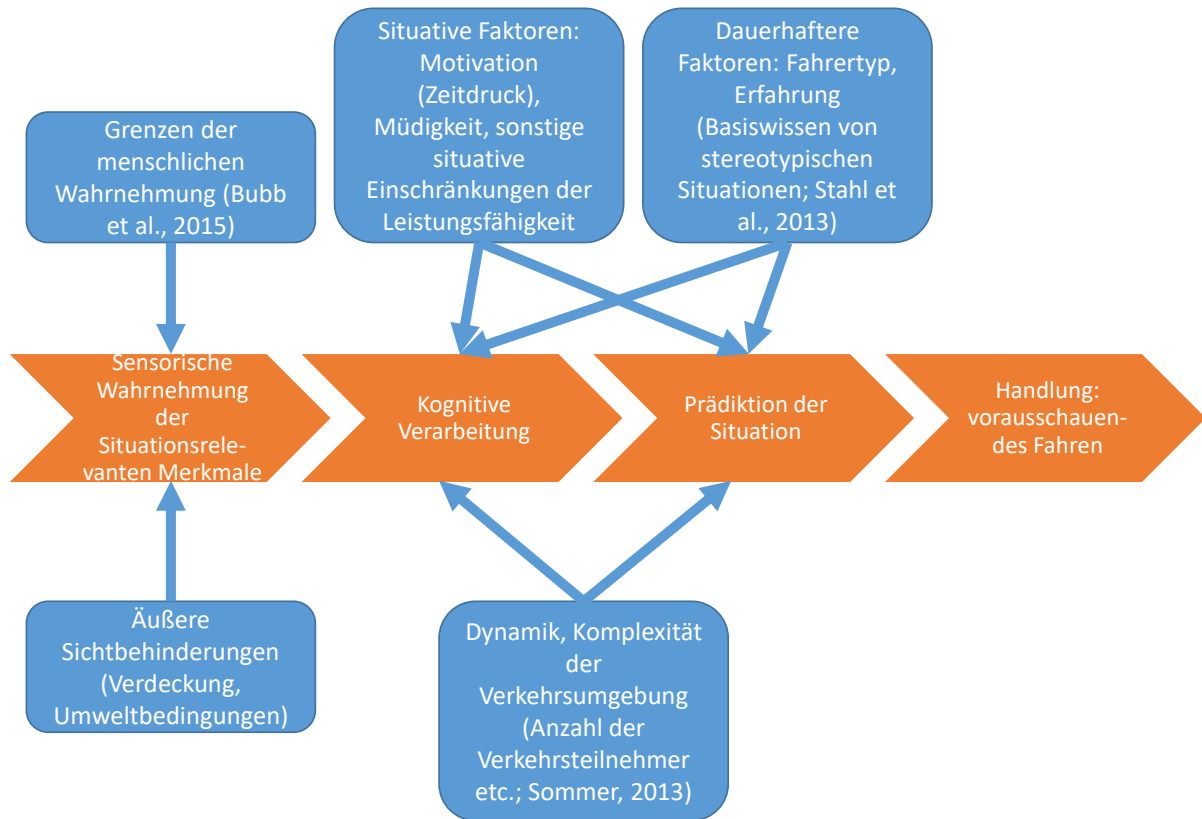


Abbildung 3-2: Vier Stufen der Informationsverarbeitung im vorausschauenden Fahren (Sommer, 2013) und Einflussfaktoren auf diese

Nach Tanida & Pöppel (2006) und Stahl et al. (2013) gibt es einen reaktiven Modus und einen antizipativen Modus des Fahrens. Beim antizipativen Fahren wird auf ein Ziel gehandelt und es wird vor allem die kommende Situation prädiziert. Beim reaktiven Fahren werden die Fahrsituationen nicht antizipiert und es wird auf Ereignisse spät reagiert. Dies entsteht vor allem, wenn der Fahrer in ungewohnte Situationen kommt. Im Prinzip liegt der Wunsch aber im Allgemeinen beim antizipativen Fahren, denn „in unbekanntem neuen Situationen führt eine mangelnde Vorhersehbarkeit der Konsequenzen des eigenen Handelns zur Verunsicherung“ (Rauch, 2009, S. 30). Entsprechend liegt nach Hoffmann (1993) ein Antizipationsbedürfnis beim Menschen vor, da der Mensch unter anderem den Wunsch hat, basierend auf seinem Verhalten, die Konsequenzen vorhersehen zu wollen.

Antizipation findet nach den drei Ebenen-Modellen von Michon (1986) und Donges (1982) auf der taktischen bzw. Führungsebene statt (Stahl et al., 2013; Schömig, Metz & Krüger, 2011). Dies bedeutet, dass sich Antizipation im Bereich von Sekunden abspielt. Es handelt sich hierbei, ausgehend vom 3-Ebenen-Modell von Rasmussen (1983), um regelbasiertes Verhalten.

Wie in Kapitel 2.1 schon beschrieben, ist für regelbasiertes Verhalten eine Zeitspanne von Sekunden bis Minuten nötig. Nach Tanida & Pöppel (2006) hat die Antizipation nur eine Handlungsreichweite von ungefähr zwei bis drei Sekunden. Auch nach Braess & Donges (2006) ist die benötigte Zeit zwei bis drei Sekunden, um auf unerwartete Ereignisse zu reagieren. Andere Autoren (Schömig et al., 2011; Popiv et al., 2009) leiten den „natürlichen Antizipationshorizont des Fahrers“ (Popiv et al., 2009) von der normalen Blickvorausschau des Fahrers ab. Diese beträgt ein bis zwei Sekunden (Schweigert, 2002). Wie aber von Sommer (2013) in Bezug auf die Veröffentlichung von Tanida & Pöppel (2006) angemerkt, scheinen die für die Antizipation genannten zwei bis drei Sekunden allgemein eher das letzte Update des Menschen zu sein, für die zeitliche Koordinierung des Handlungsablaufs. Dass diese Zeit für bestimmte Situationen nicht ausreicht, zeigen Popiv et al. (2009). Die maximale Länge des natürlichen Antizipationshorizontes liegt nach einer Literaturrecherche und der Studie von Sommer (2013) bei einer TTC von zehn Sekunden. Auch Popiv et al. (2009) geben eine Obergrenze des natürlichen Antizipationshorizontes von zehn Sekunden an und begründen dies mit der Limitation des Kurzzeitgedächtnisses auf diesen Wert. Typischerweise findet die Blickzuwendung auf das antizipationsrelevante Merkmal basierend auf den Ergebnissen von Sommer (2013) bei 75 % der Fahrer bei einer Entfernung von sieben Sekunden zum Objekt statt. Eine nachweisbare Handlung findet im Mittel bei einer Entfernung von vier Sekunden statt. Popiv, Rakic & Bengler (2011) kommen für die Reaktionen für bestimmte zum Teil kritische Fahrsituationen auf knapp 5 bis 10 s TTC vor dem Hindernis.

Für die maximale Dauer, auf die eine antizipative Handlung ausgedehnt werden kann, gehen Popiv et al. (2009) von einer Dauer von 30 s aus. Dies basiert auf der oberen Zeitgrenze für das Kurzzeitgedächtnis. Thijssen, Hofman & Ham (2014) bestimmten das Akzeptanzlimit von LKW-Fahrern für bestimmte Situationen empirisch. Im Falle einer notwendigen Verzögerung von 80 km/h auf 0 km/h lag die durchschnittliche akzeptable Obergrenze für ein frühzeitiges Verzögern bei 877 m. Dies entspricht einer TTC von fast 40 s. Popiv (2012, S. 132) empfiehlt allerdings basierend auf ihren Untersuchungen maximale Ausrollphasen von 5-6 s in der Stadt, 16 s auf der Landstraße und maximal 8 s auf der Autobahn. Längere Ausrollphasen könnten sich negativ auf die Akzeptanz auswirken.

Für den Fahrer hat antizipatives Fahren den Vorteil, dass es zu einer besseren Fahrweise mit weniger abrupten Manövern und zu mehr Komfort führt (Tanida & Pöppel, 2006). Auch wird die Sicherheit erhöht, aufgrund von frühzeitigeren und weniger starken Bremsungen, im

Gegensatz dazu, wenn diese Bremsungen überraschend auszuführen sind (Fitch, Blanco, Morgan & Wharton, 2010). Auch beim Spurwechsel sorgt eine bessere Antizipation für bessere Ergebnisse (Hofmann & Rinke, 2013), bzw. wenn nicht antizipiert wird, zu einem schlechteren Fahrverhalten (Petzoldt & Krems, 2014). Ein weiterer Aspekt von antizipativen Fahren ist, den Kraftstoffverbrauch zu verringern aufgrund von frühzeitigeren Reaktionen des Fahrers, was das Ziel dieser Arbeit ist.

### 3.2 Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme

Um das Ziel Kraftstoff einzusparen zu erreichen, ist es also entsprechend unter anderem notwendig die Antizipation zu verbessern. Dies kann mit Hilfe von Fahrerassistenzsystemen erreicht werden. Eine genauere Definition des Begriffs Fahrerassistenzsystemen wurde schon in Kapitel 2.4 im Abschnitt Fahrerassistenz geliefert. Vorausschauende Assistenzsysteme können im Idealfall die situationsrelevanten Merkmale erkennen. Außerdem übernimmt das System sowohl die für den Fahrer notwendigen zwei Schritte der kognitiven Verarbeitung und die der Prädiktion der zu vorausschauenden Situation. Ziel ist es entsprechend einen Fahrer früher über eine relevante Situation zu informieren und ihm unter Umständen eine Handlungsempfehlung zu geben. In den meisten Systemen wird auf die antizipationsrelevanten Objekte eingegangen, wie zum Beispiel den Status der Lichtsignalanlage, Hindernisse auf der Fahrbahn, Verkehrszeichen oder andere relevante Verkehrsteilnehmer. Auch Navigationsanweisungen können mit einbezogen werden (Rommerskirchen & Bengler, 2012). Dabei müssen bei der Entwicklung von HMIs folgende Aspekte betrachtet werden (Liste aus: Laquai, 2014, basierend auf Popiv, 2012):

- Inhalt: Welche Aspekte sollen dargestellt werden?
- Form: Wie sollen die Informationen kommuniziert werden?
- Ort: Wo soll die Information präsentiert werden?
- Zeit: Wann ist der richtige Zeitpunkt die Information zu übermitteln?

Das HMI für das vorausschauende Fahren sollte dabei möglichst drei Komponenten beinhalten. Erstens soll der Grund für die Handlungsaufforderung (Hindernis auf der Straße, Ampel, Verkehrszeichen etc.) ersichtlich sein. Die Handlungsaufforderung, zum Beispiel den Fuß vom Gaspedal nehmen, soll dargestellt werden, zum Beispiel durch Anzeige, Gegendruck oder Ticken des Gaspedals oder ähnliches. Als letztes sollte noch die Handlungsdauer, die Entfernung oder die Zielgeschwindigkeit angezeigt werden, damit der Fahrer sich über den Zeitrahmen bewusstwerden kann.

Als HMIs kommen dabei alle erdenklichen Methoden im Fahrzeug in Betracht. Umgesetzt wurden verschiedenste Varianten von einfachen ikonografischen Anzeigen (Popiv et al., 2010b) über komplexere Visualisierungen des Streckenverlaufs im Kombiinstrument (Popiv, 2012), mit Hilfe von Head-Up Displays (Rommerskirchen & Bengler, 2014) und kontaktanalogen Head-Up Displays (Zimmermann, Bauer, Lütteken, Rothkirch & Bengler, 2014), auf Mobilgeräten (Krause & Bengler, 2012), mit Hilfe von LED-Leisten im Fahrzeug (Laquai, Chownetz & Rigoll, 2011) und Handlungsaufforderungen durch zusätzliche haptische Unterstützung in Form eines aktiven Gaspedals (Popiv, Hajek, Rakic & Bengler, 2010a).

Theoretische Betrachtungen und Berechnungen zeigen, dass hohe Einsparungen bis zu 21 % im Kraftstoffverbrauch für beispielhafte Strecken (Reichart et al., 1998) möglich sind. Ein anderes Beispiel für LKWs geht von einem Einsparungspotential von 9,5 % aus (Thijssen et al., 2014). Untersuchungen können tatsächlich eine Verbesserung des vorausschauenden Fahrverhaltens nachweisen und entsprechende positive Einflüsse auf die Sicherheit und/oder den Kraftstoffverbrauch aufzeigen. Einen nicht vollständigen Überblick über verschiedene Studien zum Kraftstoffverbrauch bietet Tabelle 3-1. Typische Einsparungen liegen im Bereich zwischen 4 % und 12 % mit einzelnen Ausreißern für bestimmte Streckenprofile (20 %; Krause & Bengler, 2012). Auch andere Studien, die nicht direkt den Kraftstoffverbrauch gemessen oder gemittelt haben, können positive Aspekte des vorausschauenden Fahrens auf das Fahrverhalten nachweisen. Für Verzögerungen konnten Laquai et al. (2011) mit Hilfe von LED-Modulen im Fahrzeug Verbesserungen im vorausschauenden Verhalten nachweisen. Muñoz-Organero & Corcoba Magaña (2013) konnten signifikante Einsparungen an Ampeln mit Hilfe einer Smartphone Applikation nachweisen.

*Tabelle 3-1: Übersicht über die erzielten Verbrauchseinsparungen von verschiedene Studien zum vorausschauenden Fahren*

<b>Quelle</b>	<b>Verbrauchseinsparung</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
Bär, Kohlhaas, Zöllner & Scholl, 2011	8,06 %	Fahrsimulatorstudie mit HMI im Kombiinstrument; Untersuchungen nur zu Geschwindigkeitsbegrenzungen
Birrell et al., 2014a	4,1 %	Realfahrstudie mit HMI auf Smartphone;
Daun, Braun, Frank, Haug & Lienkamp, 2013	12,2 %	Fahrsimulatorstudie mit schweren LKW; HMI auf Zusatzdisplay; Warnungen vor Kurven, Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Basis digitaler Karten
Krause & Bengler, 2012	20 %	Fahrsimulatorstudie mit HMI auf Smartphone; reine Ampelassistentz, spezifisches Landstraßenszenario mit dichter Ampelfolge
Popiv, 2012	4 % - 7,5 %	Fahrsimulatorstudien mit HMI im Kombiinstrument und aktivem Gaspedal; Ampeln, Geschwindigkeitsbegrenzungen und Hindernisse (Baustellen) auf der Fahrbahn
Saint Pierre et al., 2016	4,2 %	Realfahrttests unter Nutzung verschiedener Systeme im ecoDriver-Projekt, HMI im Kombiinstrument oder auf zusätzlichem Display unter Nutzung von Daten über Geschwindigkeitsbegrenzungen, Kreuzungen, scharfe Kurven, Fußgängerüberwegen und ähnlichem
Samper & Kuhn, 2009	Bis zu 10 %	Studie auf Teststrecke; HMI im Tacho + aktives Gaspedal; nur Geschwindigkeitsbegrenzungen

Die vorher gezeigten Untersuchungen können alle den positiven Einfluss verschiedener vorausschauender Assistenzsysteme aufzeigen. Was bei allen Untersuchungen gleich ist, dass das Untersuchungsziel ist, die prinzipielle Effekte ihres oder ihrer jeweiligen Assistenzsysteme zu bewerten. Es konnten dabei verschiedene mögliche HMI-Varianten aufgezeigt, wie auch verschiedene mögliche Unterstützungsszenarien dargestellt werden. Dabei wird der prinzipielle Nutzen von vorausschauenden Assistenzsystemen für den Kraftstoffverbrauch, den Komfort und die Sicherheit aufgezeigt. Genauso kann eine Abwägung zwischen verschiedenen zum Teil multimodalen HMI-Varianten gezogen werden. Auch Einflüsse unkorrekter oder nicht exakter Anzeigen wurden untersucht (Popiv, 2012). Mögliche visuelle Ablenkungen verschiedener HMIs wurden durch Messungen des Blickverhaltens untersucht. Die visuelle Ablenkung wird dabei in verschiedenen Studien als unkritisch angesehen (Popiv, 2012; Ahlstrom & Kircher, 2017).

### 3.3 Grenzen bisheriger Untersuchungen und Untersuchungsziele zu Fahrerassistenzsystemen zum vorausschauenden Fahren

Bisherige Studien legten den Fokus auf die Ausarbeitung des Assistenzsystems und die generellen Vorteile des vorausschauenden Fahrens. Mögliche Einschränkungen in der alltäglichen kontinuierlichen und längerfristigen Nutzung wurden nicht untersucht. Der Einfluss der Fahrsituation zum Beispiel wurde nicht berücksichtigt. Die Studien wurden entweder in generischen Fahrsimulatorumgebungen oder in Realfahrtstudien mit den in der Umgebung vorhandenen Situationen untersucht, ohne den Einfluss der Komplexität dieser zu betrachten. Zum Beispiel wurde der Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer oder Sichteinschränkungen außer Acht gelassen. Genauso wurden vor allem kurze Zeiträume untersucht, mit meist einer Versuchsfahrt pro Proband und pro zu untersuchendem System. Das heißt, in den meisten Studien hatte der Proband nur die Möglichkeit, das System in einer singulären Fahrt zu erfahren. Um den Erfolg eines vorausschauenden Assistenzsystems im Alltagsumfeld zu untersuchen, sollen darum in dieser Arbeit erstens der Einfluss der Komplexität der Fahrsituation und zweitens die Änderungen in der längerfristigen Nutzung betrachtet werden.

Als Basis soll aber für diese Arbeit das von Popiv (2012) entwickelte Fahrerassistenzsystem genutzt werden. Die Hauptgründe dafür sind, dass dieses Assistenzsystem, sowohl zu den zeitlichen Aspekten, wann was angezeigt werden soll (Popiv et al., 2009), als auch zum Anzeigekonzept (Popiv et al., 2010b & Popiv et al., 2010a) umfassend untersucht worden ist. Die Zusammenfassung der Erkenntnisse und weitere Aspekte wurden von Popiv (2012) im Rahmen einer Dissertation veröffentlicht. Zusätzlich sind Daten und Anzeigekonzepte dort zugänglich. Die hier vorliegende Arbeit nutzt die Erkenntnisse aus Popiv (2012) und auch die dort entwickelten HMIs als Ausgangslage für weiter Untersuchungen. In der Arbeit wurde eine sogenannte Birds-Eye-View Visualisierung eines HMIs entwickelt (Abbildung 3-3). Das Ziel war, ein HMI zu entwickeln, das einerseits den Fahrer über relevante zukünftige Situationen informiert und daraus Handlungsempfehlungen ableitet. Die Anzeige sollte leicht zu interpretieren sein, aber auch nicht zu bevormundend wirken. Das HMI beinhaltet als Anzeigeelemente eine vereinfachte Darstellung der Straße und der kommenden Situation, in diesem Beispiel eine Baustelle und entgegenkommende Fahrzeuge. Das Egofahrzeug ändert die Farbe von Weiß (keine Handlung), über Grün (Bitte ausrollen!) zu Rot (Bitte bremsen!). Die Anzeige ist dynamisch. Die kommende Situation in der Anzeige bewegt sich kontinuierlich auf das Egofahrzeug zu, so dass der Fahrer den Abstand zur Situation abschätzen kann. Im Rundinstrument wird

noch zusätzlich die aktuell erlaubte Geschwindigkeit angezeigt. Dieses HMI hat sich, im Gegensatz zu einer ikonografischen Anzeige, als vorteilhafter herausgestellt. Außerdem sind die Akzeptanzraten sehr positiv, wie auch gewisse Fehler in der Darstellung vom Fahrer toleriert werden (Popiv, 2012).

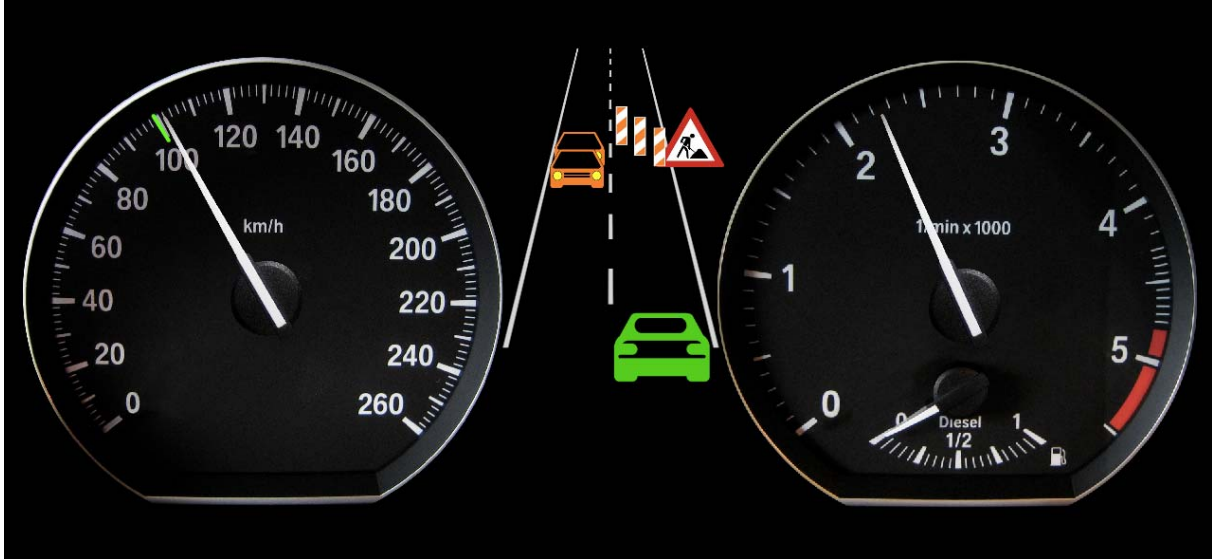


Abbildung 3-3: Beispiel des Birds-Eye-View Visualisierung des vorausschauenden Fahrerassistenzsystem in Verzögerungssituation (aus: Popiv, 2012)

In weiteren Untersuchungen wurde das HMI dahingehend verändert, dass zusätzlich Navigationssymbole in diese Metapher integriert wurden (Rommerskirchen & Bengler, 2012). Auch wurde die Anzeige für die Verwendung in einem Head-Up-Display optimiert (Rommerskirchen & Bengler, 2014). Außerdem wurde auch der vorher genutzte Fahrsimulator auf seine Validität in der Kraftstoffverbrauchsberechnung überprüft (Rommerskirchen et al., 2012). Damit können ebenso die Kraftstoffeinsparungen valide ermittelt werden.

## 4 Einfluss der Komplexität von Fahrsituationen auf das Nutzungsverhalten mit dem Fahrerassistenzsystem

Wie in den vorherigen Kapiteln gezeigt wurde, können Fahrer unter Nutzung von vorausschauenden Fahrerassistenzsystemen Kraftstoff einsparen. Allerdings wurde dabei nie beachtet, inwieweit die Fahrsituationen, in denen das System getestet wurde, einen Einfluss auf das Ergebnis haben. Dass die Fahrsituationen Einfluss auf das Ergebnis haben könnten, wurde insoweit aber in vielen Studien berücksichtigt, dass das jeweilige Assistenzsystem nicht nur in einem Situationstypus getestet wurde, sondern in mehreren, teilweise mit der Unterscheidung in Stadt, Land und Autobahn. Die folgende Studie soll zeigen, inwieweit es einen Einfluss der Fahrsituation auf das Nutzungsverhalten der Fahrer mit dem System gibt und ob es unter Umständen zu Grenzen kommt, bei denen das System nicht mehr nutzbar ist. Die folgende Studie wurde schon zu großen Teilen durch den Autor in Rommerskirchen, Helmbrecht & Bengler (2013) und Rommerskirchen et al. (2014) veröffentlicht.

### 4.1 Verkehrssituation und Komplexität

Für das Verständnis dieser Studie ist es wichtig, die verschiedenen Begriffe Fahrsituation und Verkehrssituation zu definieren und darzustellen, an welcher Stelle die Komplexität erhöht werden soll. Dabei werden die Definitionen von Fastenmeier (1995), welche durch Plavšić (2010) erweitert wurden, genutzt. Diese unterscheiden sich zum Teil von anderen Definitionen wie zuletzt zum Beispiel bei Geyer et al. (2014). Allerdings liegt bei Geyer et al. (2014) auch der Fokus darauf, Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen assistiertem und automatisiertem Fahren zu haben. Die Begriffe, die im Folgenden genauer definiert und unterschieden werden sollen, sind Verkehrssituation und Fahrsituation.

Verkehrssituation ist der übergeordnete Begriff. Er wird vor allem zur Kategorisierung genutzt, wie zum Beispiel in Unfallstatistiken. In einer Verkehrssituation werden verschiedene Fahrsituationen in Kategorien zusammengefasst. Nach Benda (1977) sind es zum Beispiel die fünf Klassen wie Straßentyp, Trasse, Sicht, Verkehrsablauf und Verhalten. Als Definition wurde von Benda (1977) die Verkehrssituation als „Umgebung des MMS Fahrer-Fahrzeug aus Fahrersicht“ definiert. Mit genau dieser Definition arbeitet auch Fastenmeier (1995). In deutschen Unfallstatistiken finden sich die Kategorisierungen unter Begriffen wie Ortstyp oder Charakterisierung (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2014).



Die Fahrsituation beschreibt eine spezifische einmalige Situation im Straßenverkehr. Eine Fahrsituation wird beschrieben durch die Umwelt, welche unter anderem die Informationen über die Straße und Witterungsbedingungen enthält, durch die Eigenschaften des Fahrzeugs und durch den Fahrer. Für den Erfolg eines Fahrerassistenzsystems gilt es, möglichst viele auf die Fahrsituation einwirkender Variablen zu betrachten. Abbildung 4-1 von Weitzel & Winner (2012) zeigt die Einflüsse auf die Fahrsituation. Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen bedeutet dies, dass ein System in möglichst vielen Fahrsituationen untersucht werden muss. Im weiteren Verlauf wird Fahrsituation zum Teil zu Situation abgekürzt.

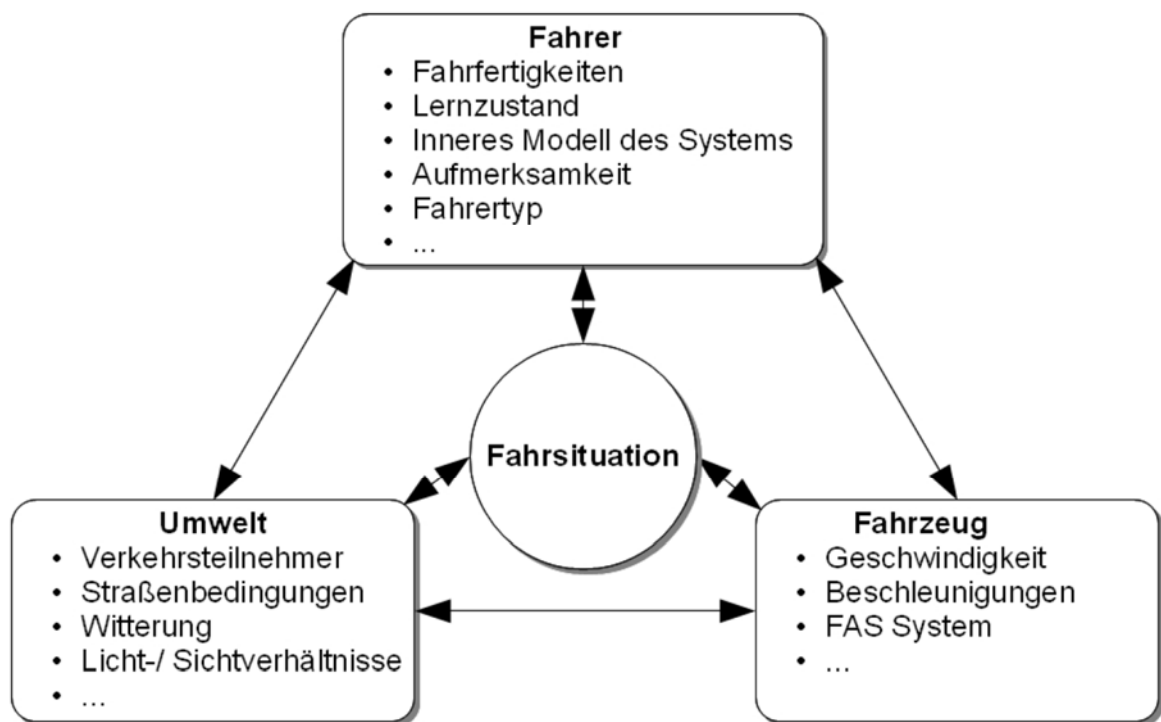


Abbildung 4-1: Einflüsse auf die Fahrsituation (Weitzel & Winner, 2012)

Der Komplexitätsgrad einer Situation wird nach Fastenmeier, Reichart & Haller (1992) bestimmt durch die vom Fahrer zu bewältigen Aufgaben unter den Gesichtspunkten Informationsverarbeitung und Fahrzeugbedientätigkeiten. Das bedeutet, in einer komplexeren Situation muss der Fahrer mehr Informationen verarbeiten und bzw. oder mehr Bedientätigkeiten durchführen. Im Rahmen dieser Studie soll der Fokus daraufgelegt werden, ob komplexere Umweltbedingungen einen Einfluss auf die Nutzung eines vorausschauenden Fahrerassistenzsystems haben. Dazu muss natürlich betrachtet werden, was eine höhere Komplexität der Umwelt

bedeutet. Die Betrachtung erfolgt hierbei aus der Sicht des Fahrers unter dem Aspekt, dass eine komplexere Umwelt mehr visuelle und kognitive Ablenkung bedeutet, welche ihn von seiner Aufgabe ökologisch, vorausschauend zu fahren ablenken. Für den Fahrer wird eine Situation komplexer unter anderem durch andere Verkehrsteilnehmer, die Sichtverhältnisse und durch zusätzliche Objekte in der Umgebung. Zusätzliche Verkehrszeichen und eine vielfältigere Szenerie können eine Fahrsituation komplizieren. Allein schon die Szenerie, Landschaft kann eine Quelle der Ablenkung sein (Regan, Young, Lee & Gordon, 2009). Dass die Umwelt in verschiedenen Fahrszenarien Einfluss auf das Blickverhalten und die mentale Beanspruchung beim Fahren haben kann, zeigt unter anderem Verwey (2000). Andere Studien (Crundall & Underwood, 1998; Patten, Kircher, Östlund, Nilsson & Svenson, 2006) zeigten den Einfluss komplexerer Situationen auf das Fahrverhalten. Allerdings wurde hierbei ein Vergleich zwischen dem Verhalten auf Landstraßen und städtischen Szenarien gezogen. Es wurde dabei davon ausgegangen, dass Stadtszenarien komplexer als Landstraßen sind. Problematisch ist, dass beim Vergleich verschiedener Situationen unter Umständen im Voraus keine Aussage getroffen werden kann, welche komplexer ist. Eine Möglichkeit dem auszuweichen ist, Situationen zu haben, die nur in genau definierten Aspekten unterschiedlich sind und sonst identisch sind. Dies kann zum Beispiel mit Hilfe von Fahrsimulatorstudien gemacht werden, indem Basissituationen erzeugt werden und diese gezielt komplexer gestaltet werden durch Hinzufügen von Verkehrsteilnehmern und/oder Objekten in der Umwelt.

## 4.2 Ziele der Studie

Die Eingangsfrage der Studie ist, ob die Komplexität der Fahrsituation Einfluss auf den Erfolg eines vorausschauenden ökologischen Fahrerassistenzsystems hat. Dabei wird der Erfolg gemessen an den erzielten Einsparungen, aber auch daran, wie der Fahrer auf das Assistenzsystem in verschiedenen Situationen genauso schnell und gleich reagiert. Außerdem wird das Blickverhalten auf das HMI betrachtet, da wie Verwey (2000) gezeigt hat, sich das Blickverhalten allgemein aufgrund unterschiedlicher Komplexität verschiedener Verkehrssituationen ändert.

Aus den vorher genannten Forschungsfragen ergeben sich darum folgende Hypothesen für die Versuche:

1. Die durch den Fahrer erzielte Kraftstoffreduzierung mit Hilfe des Fahrerassistenzsystems ändert sich aufgrund der Situationskomplexität.

2. Ebenso ändern sich die Reaktionszeiten und das Reaktionsverhalten (Bremsen anstelle von Segeln) aufgrund der Situationskomplexität.
3. Das Blickverhalten auf das HMI des Assistenzsystems ändert sich.

### **4.3 Methodik**

Die Studie wurde am Lehrstuhl für Ergonomie im statischen Fahrsimulator durchgeführt. Dabei nahmen 27 Probanden erfolgreich an der Studie teil.

#### **4.3.1 Versuchsaufbau**

Für diesen Versuch ist es wichtig genaue Fahrsituationen zu testen. Die Situationen müssen auch aus der Umwelt- und Fahrzeugperspektive für alle Probanden identisch sein. Darum wurde der Versuch am Fahrsimulator durchgeführt. Mit Hilfe der Fahrsimulation ist die exakte Einstellbarkeit und Wiederholbarkeit von Situationen gegeben (Winter, van Leeuwen & Happee, 2012). Die Studie wurde am statischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie an der TU München durchgeführt. Der technische Aufbau besteht aus einer ca. 180° Frontprojektion auf drei plane Leinwände und drei Rückprojektionen für die Außen- und den Innenspiegel. Als Mock-Up wurde ein BMW 6er Cabrio mit geschlossenem Dach gewählt (Abbildung 4-2). Abweichend von der Serienausstattung besitzt das Fahrzeug ein frei programmierbares Kombiinstrument für die Anzeige des zu testenden HMIs. Das aktive Lenkrad wird mit einer auf das Fahrzeug angepassten Lenksimulation betrieben. Die Simulationssoftware ist SILAB erweitert um die Fahrdynamiksimulation CarSim, welche unter anderem die validierte (Rommerskirchen et al., 2012) Kraftstoffverbrauchsberechnung durchführt. Ein Fahrzeug der Kompaktklasse wurde für die Fahrdynamiksimulation ausgewählt. Die Daten wurden mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet. Aufbereitet und analysiert wurden die Daten mit Matlab und SPSS.



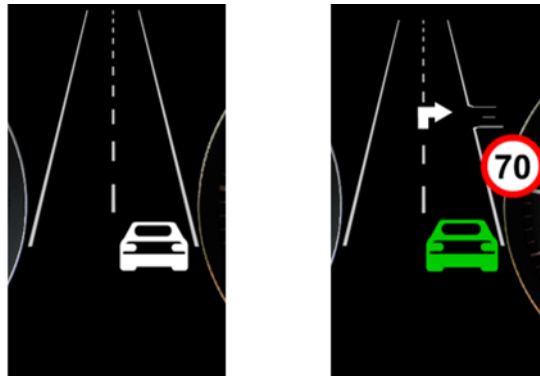
*Abbildung 4-2: Fahr Simulator des Lehrstuhls für Ergonomie*

Zusätzlich wurde für die Studie das kopfbasierte Eyetrackingsystem Dikablis zur Aufzeichnung des Blickverhaltens genutzt. Die einzige analysierte Area of Interest ist das Kombiinstrument mit dem HMI. Die aufgezeichneten Blickdaten wurden mit Hilfe der Software D-Lab ausgewertet.

#### **4.3.2 Das vorausschauende Fahrerassistenzsystem**

Für die Studie wurde das bereits aus vorherigen Studien in Variationen bekannte HMI für die vorausschauende Fahrerassistenz benutzt. Genutzt wurde das System aus der Studie von Rommerskirchen & Bengler, 2012, welches auf den Ergebnissen von Popiv, 2012 basiert (vgl. Kapitel 3.3). Das System nutzt nur visuelle Anzeigen im Kombiinstrument zur Unterstützung des Fahrers. Das HMI ist zentral zwischen Tachometer und Drehzahlmesser platziert. Die Idee des Assistenzsystems basiert darauf, dem Fahrer zukünftige, für das Verzögern relevante, Ereignisse anzuzeigen. Das HMI zeigt eine virtuelle vereinfachte Straße aus der Vogelperspektive. Zukünftige niedrigere Geschwindigkeitsbegrenzungen und Ampeln werden an den entsprechenden Stellen entlang der virtuellen Straßen angezeigt und kommen auf den Fahrer zu, so dass nach einer sehr kurzen Einlernphase eine leichte Einschätzung möglich ist, wie weit das Hindernis entfernt ist und wie schnell der Fahrer dieses erreicht. Zum besseren Verständnis wird auch das eigene Fahrzeug (Egofahrzeug) dargestellt. Das Egofahrzeug wechselt die Farbe von weiß nach grün, wenn ein Ausrollen durch den Fahrer erforderlich ist. Die maximale Vorwarnzeit, bei der die Anzeige im Voraus angezeigt wird, beträgt 20 s, weil dies als Grenze des Kurzzeitgedächtnisses gilt (Popiv et al., 2009). Navigationshinweise sind auch in der Anzeige

integriert. Abbildung 4-3 zeigt das HMI, wenn keine Handlung erforderlich ist und innerhalb einer vorausschauenden Situation.



*Abbildung 4-3: HMI-Basisanzeige (links) und innerhalb einer Situation mit Geschwindigkeitsbegrenzung und Navigationshinweis (rechts)*

### **4.3.3 Versuchsstrecke**

Der Fokus der Studie liegt, wie eingangs schon erwähnt, auf der Analyse des Fahr- und Blickverhaltens abhängig von der Situationskomplexität. Deswegen muss beim Erstellen der Versuchsstrecke speziell auf die Umsetzung der Verkehrssituationen in der Simulation geachtet werden. Für diese Studie wurden verschiedene Verkehrsszenarien aus der Stadt und Überland ausgesucht und implementiert.

Die Versuchsstrecke hat eine Länge von ca. 18 km, davon 13,5 km Überlandfahrt (Landstraßen) und 4,5 km Stadtfahrt. Die Dauer einer Fahrt beträgt ungefähr 20 min. Es wurden sechs verschiedene Verkehrsszenarien, drei Überland- und drei Stadtszenarien, für die Untersuchung ausgewählt und implementiert. Von jeder dieser sechs Verkehrsszenarien wurden drei Varianten an Verkehrssituationen in der Fahrsimulation aufgebaut. Daraus folgt es sind insgesamt 18 Situationen in der Versuchsstrecke enthalten. Im Folgenden erfolgt eine Beschreibung der sechs ausgewählten Verkehrsszenarien:

1. Zufahren auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h bei vorherigen 100 km/h auf der Landstraße
2. Zufahren auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h bei vorherigen 100 km/h auf der Landstraße mit einem kurz darauf folgendem Abbiegemanöver nach rechts (Abbildung 4-4 links)
3. Zufahren auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h bei vorherigen 100 km/h auf der Landstraße und einer kurz darauffolgenden roten Ampel mit Linksabbiegen

4. Linksabbiegen an einer grünen Ampel in der Stadt
5. Linksabbiegen an einem Vorfahrt gewähren Schild und Linksabbiegen in der Stadt
6. Rechtsabbiegen an einer roten Ampel in der Stadt (Abbildung 4-4 rechts)

Da das Ziel der Studie den Einfluss der Komplexität zu bewerten ist, musste eine Lösung gefunden werden, wie Verkehrssituationen in Ihrer Komplexität verglichen werden können. Darum wurden von allen gerade erwähnten Verkehrsszenarien drei verschiedene Varianten von Verkehrssituationen erstellt. Für die Umsetzung wurde zuerst eine Basisverkehrssituation mit wenig oder gar keinem Fremdverkehr und möglichst wenig visueller Ablenkung erstellt. Die komplexeren Varianten wurden von der Basissituation abgeleitet, indem zusätzlicher Fremdverkehr, Fußgänger, zusätzliche Verkehrszeichen und andere Objekte, die unter Umständen wichtig für den Fahrer sein könnten, hinzugefügt wurden. Auch wurde zum Teil variiert indem einige Verkehrssituationen nachts durchfahren werden mussten. Es wurden allerdings weder das Streckenprofil (Länge von Geraden, Kurvenradien) geändert, noch wurden Einschränkungen eingeführt, die es nicht möglich gemacht hätten, vorausschauend zu fahren oder die den Fahrer in ein anderes Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsprofil zwingen. Es wurden zum Beispiel keine Hindernisse für den Fahrer platziert, so dass dieser zusätzlich abbremsen müsste. Abbildung 4-4 zeigt wie in zwei verschiedenen Szenarien die Komplexität erhöht wurde.

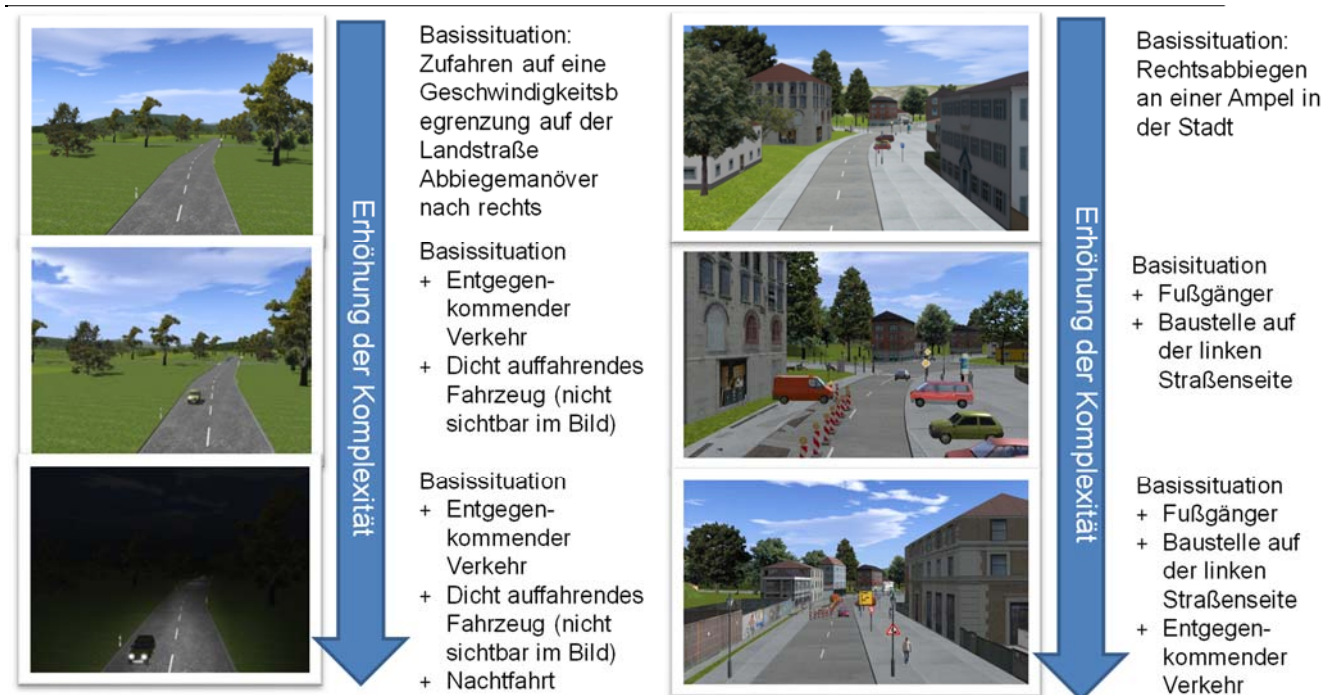


Abbildung 4-4: Erhöhung der Komplexität eines Landstraßenszenarios (links, Szenario 2) und eines Stadtszenarios (rechts, Szenario 6)

Die so erstellten Situationen wurden in zufälliger Reihenfolge, zur Vermeidung von Lerneffekten, zu zwei Versuchsstrecken zusammengefügt. Die beiden Versuchsstrecken unterscheiden sich nur durch die Reihenfolge der 18 Situationen. Zwischen den Untersuchungssituationen wurden zum Teil Übergangsabschnitte eingefügt, um eine realistische Strecke zu haben und um möglichst immer gleiche Startbedingungen für die jeweiligen Untersuchungsszenarien zu haben.

#### 4.3.4 Probandenkollektiv und Versuchsablauf

An dem Versuch nahmen 27 Probanden erfolgreich teil. Von den Probanden waren 21 männlich und sechs weiblich. Das Durchschnittsalter der Probanden zum Versuchszeitpunkt lag bei 27 Jahren. Der jüngste Proband war 19 Jahre, der älteste 59 Jahre alt. Die Probanden wurden über Aushänge am Unigelände, in den lokalen Supermärkten oder über den Freundes- und Bekanntenkreis von den am Lehrstuhl arbeitenden Studenten rekrutiert. Alle Probanden verfügten über eine gültige PKW-Fahrerlaubnis. Keiner der Probanden hatte am Lehrstuhl an einer früheren Studie zum vorausschauenden Fahren oder allgemein im Bereich Fahrerassistenzsysteme teilgenommen. Aufgrund der komplexen Streckencharakteristik mit vielen Abbiegemanövern und Verzögerungssituationen kam es zu einer hohen Ausfallquote von ungefähr 30% der eingeladenen Probanden durch die sogenannte Simulatorkrankheit.

Es wurde jeweils ein Versuch mit Messwiederholung, einer Baselinefahrt und einer Assistenzfahrt, durchgeführt. Da nahezu kein Proband Erfahrung mit dem Fahrsimulator am Lehrstuhl oder allgemein mit anderen Fahrsimulatoren hatte, bekamen alle Probanden am Anfang der Studie eine Einführung in den Fahrsimulator und den Hinweis, dass sie jederzeit den Versuch vor allem wegen Unwohlseins (Simulatorkrankheit) abbrechen dürfen. Außerdem durften sie sich in einer 20-minütigen Fahrt vor dem eigentlichen Versuchsteil an den Fahrsimulator gewöhnen. Danach wurden die eigentlichen zwei Versuchsfahrten durchgeführt. Davon war eine Fahrt die Baselinefahrt ohne Assistenzunterstützung und eine Fahrt mit Assistenz. Die Reihenfolge der beiden Fahrten wurde zwischen den verschiedenen Probanden permutiert, so dass die eine Hälfte der Probanden mit der Baselinefahrt startete, die andere Hälfte mit der Assistenzfahrt. Vor der Assistenzfahrt bekamen die Probanden eine kurze Erklärung des Assistenzsystems. Die Anweisung an die Probanden lautete, sich so gut wie möglich so zu verhalten, wie sie es auch in der Realität tun würden. Außerdem wurde den Probanden gesagt, dass das Assistenzsystem sie in Ihrer Fahraufgabe unterstützt und sie dadurch sparsamer fahren können, aber sie müssen nicht den Anweisungen des Assistenzsystems folgen.

Vor dem Experiment mussten die Probanden einen demografischen Fragebogen ausfüllen. Nach der Fahrt mit dem Assistenzsystem mussten die Probanden einen Fragebogen ausfüllen, der den NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988), einen Fragebogen zur Einstellung zum Fahrerassistenzsystem nach Arndt (2011) und einen Fragebogenteil der verschiedene Eigenschaften des Fahrerassistenzsystems bewerten soll, welcher auch nach Arndt (2011) erstellt wurde, enthält. Außerdem mussten die Probanden noch einzelne offene Fragen zum Gesamtsystem beantworten. Die Fragebögen sind im Anhang zu finden (Abschnitt A).

#### **4.4 Ergebnisse**

Insgesamt waren neun verschiedene Verkehrsszenarien mit jeweils drei verschiedenen Verkehrssituationen auszuwerten. Da die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien in ihren Ergebnissen alle relativ ähnlich sind, werden im Folgenden die Ergebnisse von zwei Szenarien detaillierter dargestellt. Die anderen Szenarien werden nur erwähnt, falls sie sich in ihren Ergebnissen unterscheiden. Die tabellarischen Auswertungen zu den anderen Situationen befinden sich im Anhang. Bei den hier genauer beschriebenen Szenarien handelt es sich um die in Abbildung 4-4 beschriebenen Szenarien. Einmal ist es das Szenario 2 bei 100 km/h zufahren auf



eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h auf der Landstraße mit einem kurz darauffolgendem Abbiegemanöver nach rechts. Beim zweiten Szenario handelt es sich um ein Rechtsabbiegen an einer roten Ampel in der Stadt (Szenario 6).

Wie schon im Versuchsablauf beschrieben, wurde der Versuch mit Messwiederholung, Baselinefahrt und Assistenzfahrt, durchgeführt. Darum wurden zur Auswertung der Vergleiche zwischen Baselinefahrt und Assistenzfahrt t-Tests mit Messwiederholung durchgeführt. Zur Auswertung des Einflusses der Situationskomplexität innerhalb eines Szenarios wird eine ein-faktorielle Varianzanalyse benutzt. Im Falle der Verletzung des Sphärizitätskriteriums wird die Greenhouse-Geisser Korrektur angewandt. Für die Post-hoc Analyse wird die Bonferroni Korrektur angewandt. Das angewendete Signifikanzniveau beträgt  $\alpha = 5\%$ .

#### **4.4.1 Kraftstoffverbrauch**

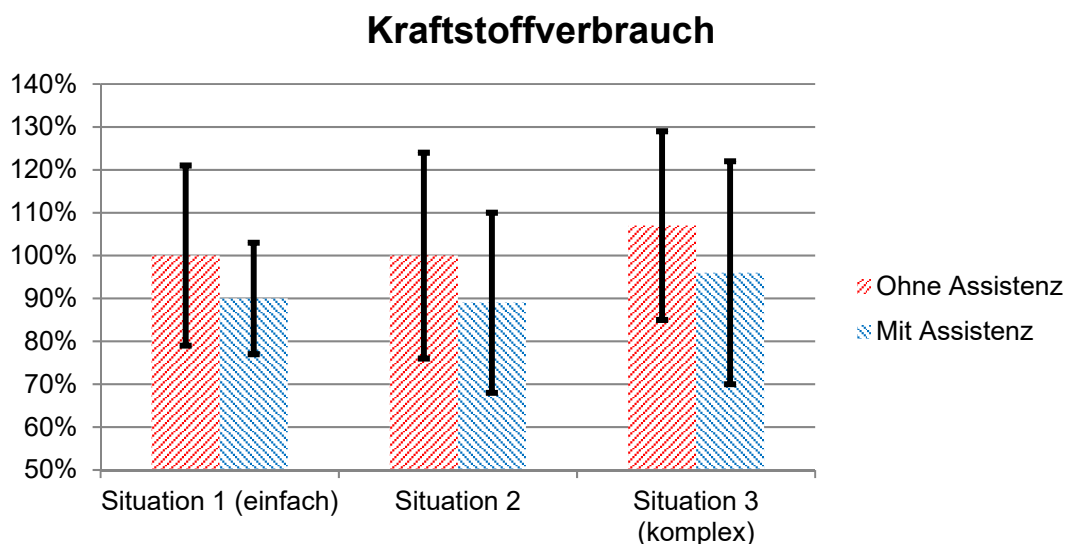
Der Kraftstoffverbrauch, gemessen über die gesamte Versuchsstrecke, hat sich mit Hilfe des Assistenzsystems signifikant um 10,3% ( $t(26) = 6,11, p < 0,05$ ) verringert. Dabei hat sich die einzelne Fahrdauer im Schnitt nur um 4,1% ( $t(26) = 5,14, p < 0,05$ ) verlängert.

Für die folgende Darstellung der Ergebnisse wird in jedem Szenario der Kraftstoffverbrauch, der in der einfachsten Situation in der Baseline im Schnitt gemessen wird, mit 100% definiert. Der Verbrauch in allen anderen Situationen wird in Abhängigkeit der vorher genannten Situation angegeben.

Im Szenario des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h auf der Landstraße mit anschließendem Abbiegen nach rechts, ist die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs mit Hilfe des Assistenzsystems signifikant in allen Situationen, unabhängig von der Komplexität (Tabelle 4-1 und Abbildung 4-5). Die durchschnittliche Einsparung beträgt um die 10%. Sowohl mit als auch ohne Assistenzsystem scheint der Verbrauch in der komplexesten Situation höher zu sein. Allerdings ist der Unterschied zwischen den verschiedenen Komplexitätsgraden weder in der Baseline signifikant ( $F(2; 52) = 1,35, p = 0,27$ ) noch in den Fahrten mit dem Assistenzsystem ( $F(2; 52) = 1,19, p = 0,31$ ).

*Tabelle 4-1: Ergebnisse des Kraftstoffverbrauchs im Szenario des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße (Szenario 2)*

Kraftstoffverbrauch		Grad der Komplexität		
		Sit. 1 (einfach)	Sit. 2	Sit. 3 (komplex)
Ohne FAS	Mittelwert	100%	100%	107%
	SD	21%	24%	22%
Mit FAS	Mittelwert	90%	89%	96%
	SD	13%	21%	26%
Signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchs?		Ja $t(26) = 2,32,$ $p < 0,05$	Ja $t(26) = 2,28,$ $p < 0,05$	Ja $t(26) = 2,56,$ $p < 0,05$



*Abbildung 4-5: Kraftstoffverbrauch im Szenario des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße (Fehlerbalken geben Standardabweichung an)*

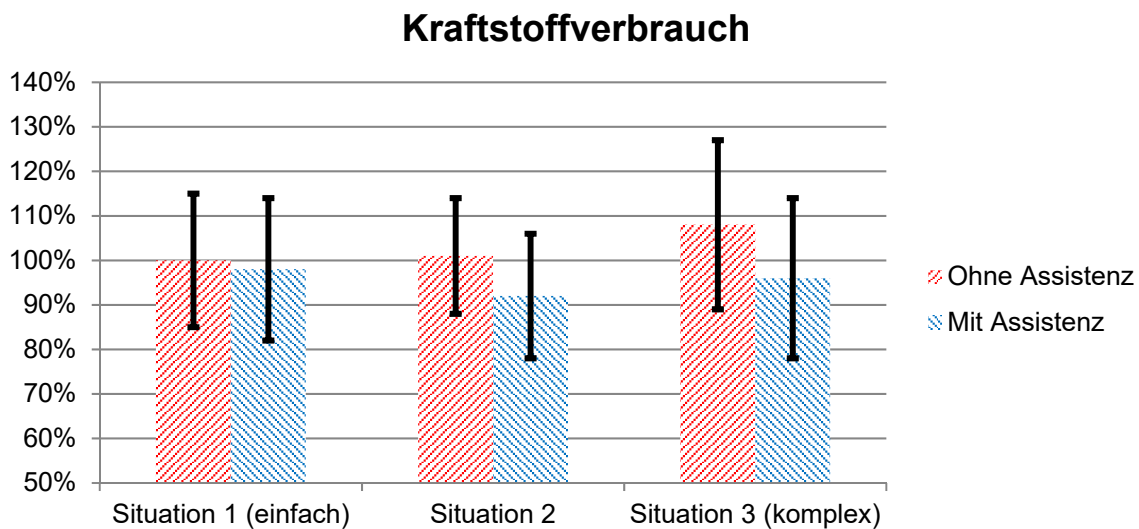
In den anderen beiden Landstraßenszenarien sind die Ergebnisse vergleichbar, obwohl das Einsparpotential des Assistenzsystems mit bis zu 28% tendenziell höher ist.

Im städtischen Verkehrsszenario des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel (siehe auch Abbildung 4-4 rechts) werden zwischen 2% und 12% Kraftstoffeinsparungen mit Hilfe des Assistenzsystems erzielt. In den Fahrten ohne Assistenzsystem werden etwas unterschiedliche mittlere Verbräuche in den verschiedenen Situationen gemessen. Allerdings sind die Unterschiede statistisch nicht signifikant ( $F(1,64; 42,8) = 2,30, p = 0,122$ ). Genauso verhält es sich mit

dem Vergleich der Assistenzfahrten untereinander ( $(F(2; 52) = 1,11, p = 0,336)$ ). In der einfachsten Situation sind die Kraftstoffeinsparungen nicht signifikant. In den komplexeren allerdings schon. Ein Überblick über die Ergebnisse geben die Tabelle 4-2 und Abbildung 4-6.

*Tabelle 4-2: Ergebnisse des Kraftstoffverbrauchs im städtischen Szenario des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel (Szenario 6)*

Kraftstoffverbrauch		Grad der Komplexität		
		Sit. 1 (einfach)	Sit. 2	Sit. 3 (komplex)
Ohne FAS	Mittelwert	100%	101%	108%
	SD	15%	13%	19%
Mit FAS	Mittelwert	98%	92%	96%
	SD	16%	14%	18%
Signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchs?		Nein $t(26) = 0,58,$ $p = 0,57$	Ja $t(26) = 3,39,$ $p < 0,05$	Ja $t(26) = 3,26,$ $p < 0,05$



*Abbildung 4-6: Kraftstoffverbrauch im städtischen Szenario des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel (Fehlerbalken geben Standardabweichung an)*

In den anderen städtischen Verkehrsszenarien ist der Einspareffekt deutlich niedriger und zum Teil auch statistisch nicht nachweisbar. Insgesamt sind statistisch signifikante Einsparungen in 12 von 18 Situationen nachweisbar (siehe auch Anhang B). Dies liegt vor allem an den dortigen erlaubten Ausgangsgeschwindigkeiten von nur 30 km/h. Dadurch sind die Differenzgeschwindigkeiten und die Verzögerungsdauern geringer.

In allen betrachteten Situationen, sowohl in der Stadt als auch Überland, konnten allerdings keine signifikanten Unterschiede aufgrund der Situationskomplexität im Zusammenhang mit Kraftstoffeinsparungen beobachtet werden.

#### **4.4.2 Geschwindigkeit und Beschleunigung**

Im Folgenden wird betrachtet, welches Fahrverhalten für die Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch verantwortlich ist. Die Betrachtung des Fahrverhaltens erfolgt zuerst mit Hilfe der aufgezeichneten über alle Fahrer gemittelten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe.

Zuerst wird überprüft, ob die Ausgangslage bei den jeweiligen Situationen immer die gleiche ist. Young et al. (2011) und andere zeigen auf, dass eine vom Fahrer aktiv gewollte und durchgeführte Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs meistens mit einer Reduzierung der Geschwindigkeit einhergeht. Das bedeutet, dass Fahrer ihre erlaubte Höchstgeschwindigkeit nicht ausnutzen, wenn sie sparsam fahren wollen. Aus den Geschwindigkeitsverläufen aus Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 wird relativ leicht ersichtlich, dass keine Unterschiede, abhängig ob mit oder ohne Assistenz gefahren wird, am Anfang der Situation, vor der Handlungsaufforderung, vorhanden sind. Die zulässige Geschwindigkeit liegt zu Beginn der Landstraßensituation bei 100 km/h, in der Stadt bei 50 km/h. Gut sichtbar allerdings ist im weiteren Verlauf der Unterschied zwischen der Fahrt mit der Assistenz und ohne Assistenz. Auf der Landstraße wird die Geschwindigkeit früher gedrosselt und es wird nicht mehr so hoch beschleunigt. Auch in der Stadt wird der Unterschied in den Geschwindigkeitsverläufen sichtbar. Hier wird die Anfangsgeschwindigkeit bei der Fahrt mit der Assistenz früher reduziert.

EINFLUSS DER KOMPLEXITÄT VON FAHRSITUATIONEN AUF DAS NUTZUNGSVERHALTEN  
MIT DEM FAHRERASSISTENZSYSTEM

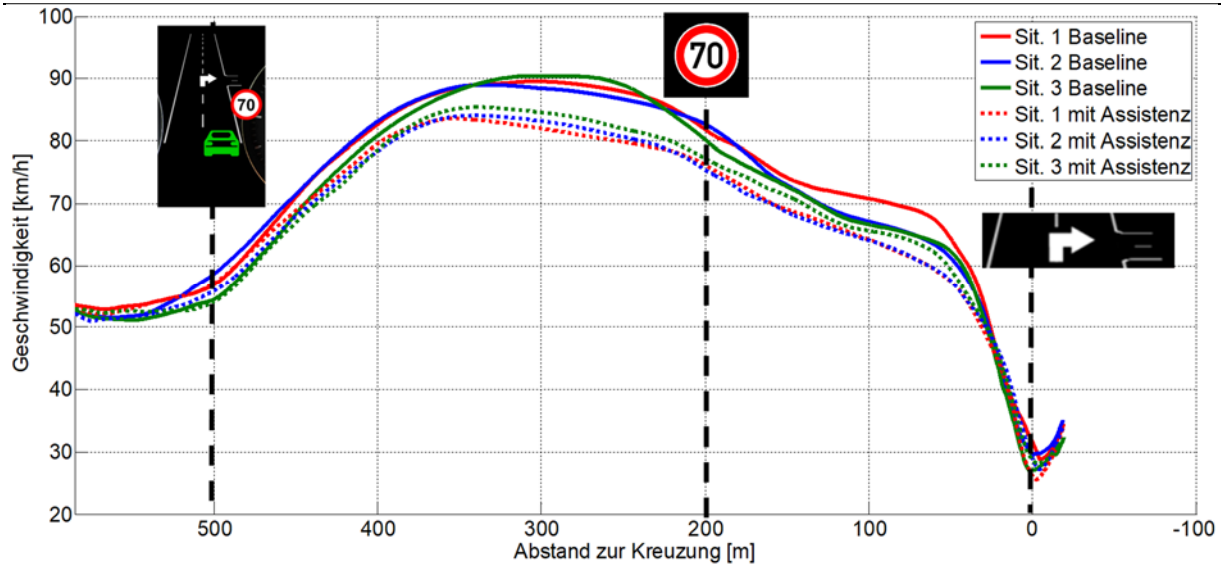


Abbildung 4-7: Geschwindigkeitsverlauf (mittlere Geschwindigkeiten aller Fahrer) der Fahrten mit und ohne Assistenz in der Verkehrssituation des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße

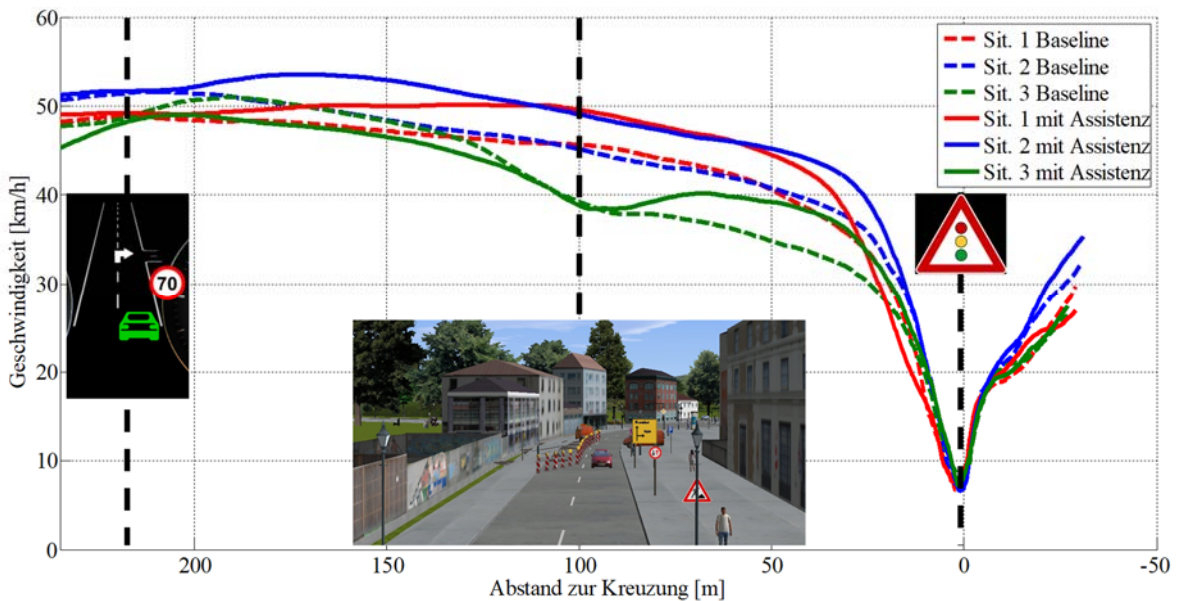


Abbildung 4-8: Geschwindigkeitsverlauf der Fahrten (mittlere Geschwindigkeiten aller Fahrer) mit und ohne Assistenz in der städtischen Verkehrssituation des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel mit Darstellung des Baustellenbereiches in den komplexeren Situationen

Auch im Beschleunigungsverlauf (Abbildung 4-9) spiegelt sich das unterschiedliche Verhalten mit und ohne Assistenzsystem wieder. Kurz nach dem Anzeigzeitpunkt ist die Beschleunigung auf der Landstraße deutlich niedriger, als wenn ohne Assistenz gefahren würde. Das dies auf die Assistenz zurückzuführen ist, wird vor allem dadurch deutlich, dass sich im

weiteren Verlauf die Beschleunigungskurven dann nicht mehr stark unterscheiden. Das bedeutet, dass die gesamten wichtigen Einsparungen im Kraftstoffverbrauch durch die frühzeitigere Reaktion und das Vermeiden unnötiger Beschleunigungen entstehen. Abbildung 4-9 zeigt exemplarisch den Beschleunigungsverlauf auf der Landstraße in der Verkehrssituation mit der geringsten Komplexität.

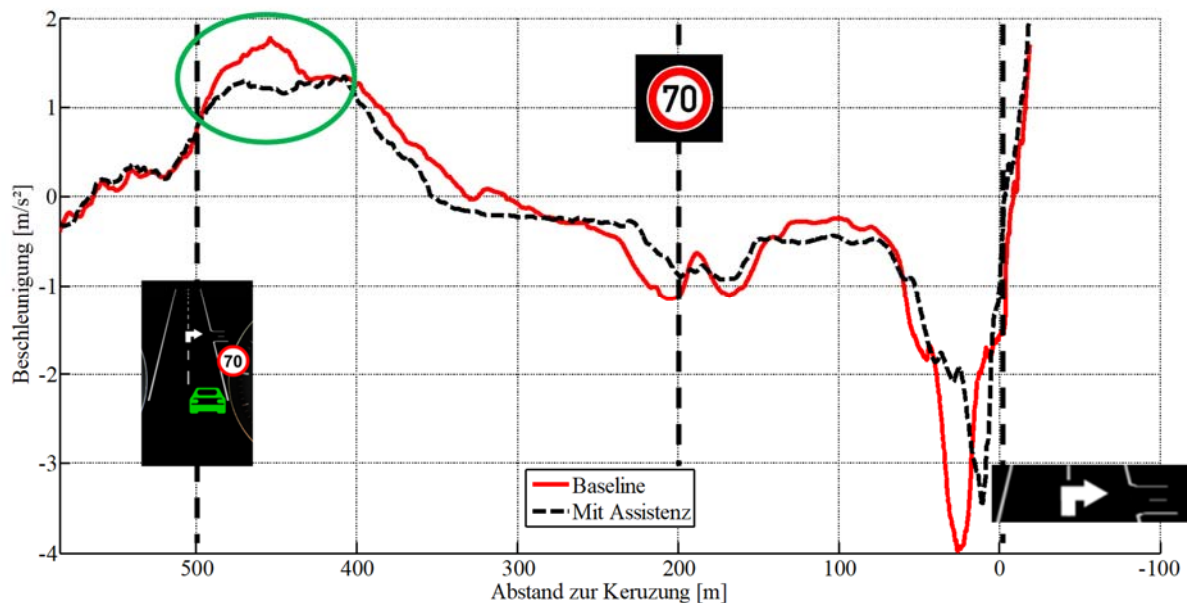


Abbildung 4-9: Beschleunigungsverlauf (mittlere Beschleunigungen aller Fahrer) der Fahrten mit und ohne Assistenz in der Verkehrssituation des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließend Abbiegen auf der Landstraße in der niedrigsten Komplexitätsstufe

Ein ähnliches Verhalten kann auch in der Stadt nachgewiesen werden. Hier wird im Mittel nicht weniger beschleunigt, sondern anstatt zu beschleunigen wird leicht verzögert. Das deutet drauf hin, dass die Probanden hier das Fahrzeug frühzeitig ausrollen lassen, wie vom Assistenzsystem vorgesehen. Ein Beispiel für das Beschleunigungsverhalten in der Stadt zeigt Abbildung 4-10.

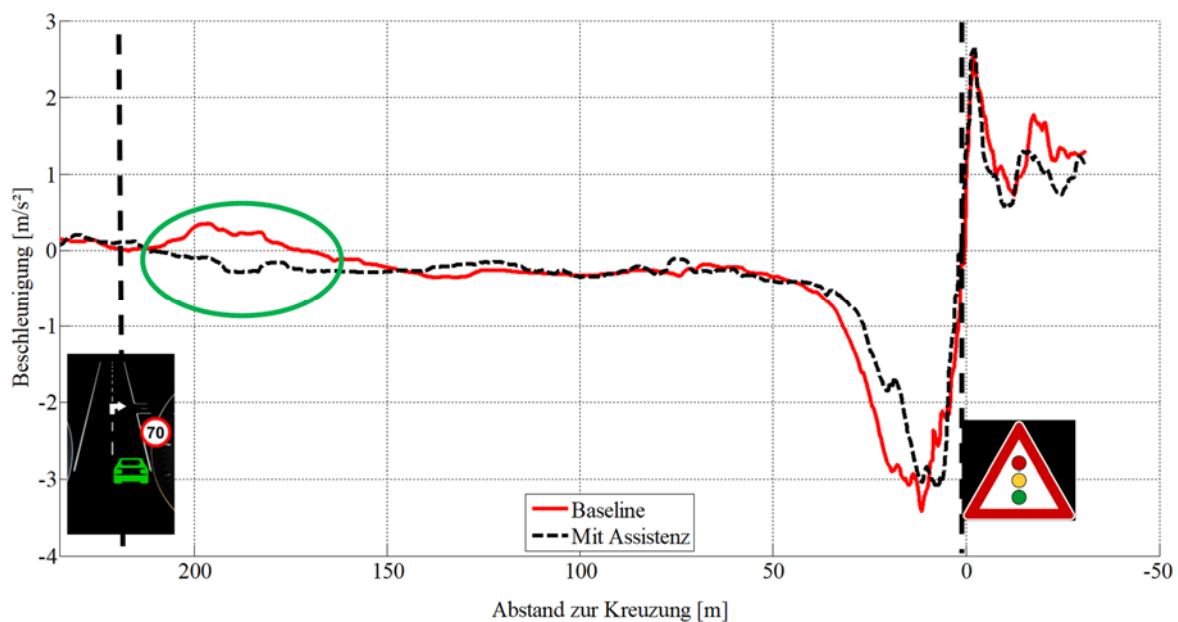


Abbildung 4-10: Beschleunigungsverlauf der Fahrten (mittlere Beschleunigung aller Fahrer) mit und ohne Assistenz einer Verkehrssituation in der städtischen Verkehrssituation des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel in der mittleren Komplexitätsstufe

Die beschriebenen Geschwindigkeits- und auch Beschleunigungsverläufe zeigen anschaulich, wodurch die Ersparnisse im Kraftstoffverbrauch entstehen. Ein Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass im zeitlichen Verlauf entstehende Unterschiede erfasst werden können, die für die Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zuständig sind. Zusätzlich wurden noch t-Tests durchgeführt, um Änderungen in den Fahrparametern beobachten zu können. Dazu wurden verschiedene Parameter betrachtet wie Durchschnittswerte, Standardabweichungen, Maximalwerte, Minimalwerte oder der Reaktionszeiten auf die Anzeige. Es wurden längsdynamische Parameter untersucht, welche der Fahrer direkt manipuliert, wie Gaspedal- und Bremspedalstellung, sowie sich daraus ergebende Werte, wie die Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung. Alle diese Variablen haben einen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch.

Tabelle 4-3 zeigt die Anzahl der signifikanten Änderungen im Vergleich von Fahrten mit und ohne Assistenzsystem der untersuchten fahrdynamischen Parameter über alle 18 Verkehrssituationen mit Hilfe eines zweiseitigen t-Tests. Mit Hilfe des Assistenzsystems verringert sich vor allem die mittlere Gaspedalstellung, die Dauer der Gaspedalbetätigung und der Reaktionszeitpunkt auf das Hindernis kommt früher. Der Reaktionszeitpunkt ist der Punkt an dem der Fahrer das erste Mal den Fuß komplett vom Gaspedal nimmt und somit das Ausrollen startet. Die maximalen Pedalstellungen im Gegensatz ändern sich mit dem Assistenzsystem nicht.

EINFLUSS DER KOMPLEXITÄT VON FAHRSITUATIONEN AUF DAS NUTZUNGSVERHALTEN  
MIT DEM FAHRERASSISTENZSYSTEM

*Tabelle 4-3: Anzahl der signifikanten Änderungen fahrdynamischer Parameter im Vergleich von Fahrten mit und ohne Assistenz in den 18 untersuchten Verkehrssituationen (2 seitiger t-Test mit Messwiederholung)*

Variable	Häufigkeit der signifikanten Änderung	Erhöhung oder Verringerung des Wertes mit Assistenz?
Mittlere Gaspedalstellung	14 von 18 (78 %)	↓
Kraftstoffverbrauch	12 von 18 (67 %)	↓
Dauer Gaspedalbetätigung	12 von 18 (67 %)	↓
Reaktionszeitpunkt	12 von 18 (67 %)	↓
Mittlere Geschwindigkeit	11 von 18 (61 %)	↓
Gesamtdauer der positiven Beschleunigung	11 von 18 (61 %)	↓
Standardabweichung der Geschwindigkeit	10 von 18 (56 %)	↓ (8x), ↑ (2x)
Maximale Geschwindigkeit	9 von 18 (50 %)	↓
Standardabweichung der Beschleunigung	9 von 18 (50 %)	↓
Mittlere Bremspedalstellung	8 von 18 (44 %)	↓
Standardabweichung der Bremspedalstellung	7 von 18 (39 %)	↓
Mittlere Beschleunigung	7 von 18 (39 %)	↑ (6x), ↓ (1x)
Dauer der Bremspedalbetätigung	5 von 18 (28 %)	↓
Häufigkeit der positiven Beschleunigung	4 von 18 (22 %)	↓
Standardabweichung der Gaspedalstellung	4 von 18 (22 %)	↓
Minimale Geschwindigkeit	3 von 18 (17 %)	↓ (2x), ↑ (1x)
Anzahl der Bremspedalbetätigungen	3 von 18 (17 %)	↓
Maximale Verzögerung	2 von 18 (11 %)	↑
Maximale Bremspedalstellung	2 von 18 (11 %)	↓
Maximale Beschleunigung	1 von 18 (6 %)	↓
Anzahl der Gaspedalbetätigungen	1 von 18 (6 %)	↓
Maximale Gaspedalstellung	0 von 18 (0 %)	↔

Diese Ergebnisse entsprechen auch den Erwartungen. Das Assistenzsystem zeigt dem Fahrer den optimalen Ausrollzeitpunkt. Das bedeutet, der Fahrer soll zu diesem Zeitpunkt den Fuß vom Gaspedal nehmen. Daraus ergibt sich, wenn der Fahrer diesen Anweisungen folgt, dass sich die mittlere Gaspedalstellung und die Dauer der Gaspedalbetätigung reduzieren. Genauso zeigt der Reaktionszeitpunkt, dass der Fahrer den Anweisungen des Systems folgt. Die niedrigere mittlere Geschwindigkeit ist ein Ergebnis des früher gestarteten Verzögerungsvorgangs.



Beachtet werden muss, dass hier nur zu antizipierende Verzögerungssituationen untersucht wurden und aus diesen Parameter kein Wunschfahrerverhalten für ein allgemeines kraftstoffeinsparendes Verhalten abgeleitet werden kann. Für eine allgemeine ökologische Fahrweise können andere Parameter einen größeren Einfluss haben (vgl. Tabelle 2-8 in Kapitel 2.3)

#### **4.4.3 Blickverhalten**

Laut der dritten Hypothese zu diesem Versuch ändert sich das Blickverhalten auf das HMI in komplexeren Situationen. Laut den NHTSA Guidelines für Ablenkung dürfen Blickabwendungen von der Straße nicht mehr als 2 s betragen (National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2013). Darum wurde nur das Blickverhalten auf das HMI ausgewertet. Aufgrund von Problemen mit dem Blickerfassungssystem bei einem Probanden standen nur 26 Datensätze zur Auswertung zur Verfügung. Da die Analyse Software nur die Zeit, mit der ein Proband auf eine Area of Interest blickt, messen kann und nicht auch noch zusätzlich die Übergangszeit bestimmt wird, wird nur die Verweildauer entsprechend der DIN EN ISO 15007-1 angegeben. Blinzeln von Probanden mit einer Dauer von unter 120 ms, wie auch Streifblicke mit derselben Dauer, werden von der Analysesoftware ignoriert.

Im Szenario des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße (Tabelle 4-4) unterscheiden sich die durchschnittlichen Blickverweildauern auf das HMI abhängig von der Komplexität nicht signifikant ( $F(1,6; 40,6) = 1,98; p > 0,05$ ). Sie liegen bei durchschnittlich 0,55 s in der einfachsten Verkehrssituation und 0,63 s in der komplexesten. Diese Zeiten liegen im gleichen zeitlichen Rahmen, den andere Studien für durchschnittlichen Blicke auf den Kilometerzähler (0,69 s, Sodhi, Reimer & Llamazares, 2002) oder auf den Tachometer (0,61 s, Schweigert, 2002) gemessen haben. Unterschiede werden erst im Anteil der HMI-Blicke an der Gesamtblickdauer, während des Durchfahrens eines Verkehrsszenarios sichtbar. Im genannten Landstraßenszenario wird zum Beispiel in der einfachsten Komplexitätsstufe in 22,6 % der Zeit auf das HMI geblickt, in der höchsten Komplexitätsstufe 15,8 %. Die Unterschiede zwischen den Situationen sind signifikant ( $F(2; 50) = 11,37; p < 0,05$ ). Der Post-hoc-Test zeigt einen Unterschied zwischen Situation 1 (einfach) und Situation 3 (komplex) sowie zwischen Situation 2 und Situation 3. Die maximale Blickverweildauer aller Probanden auf das HMI liegt unter 2 s. Das heißt, kein einziger Proband hat die Grenze der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (2013) von 2 s maximaler Blickabwendungsdauer verletzt.

EINFLUSS DER KOMPLEXITÄT VON FAHRSITUATIONEN AUF DAS NUTZUNGSVERHALTEN  
MIT DEM FAHRERASSISTENZSYSTEM

*Tabelle 4-4: Blickverweildauern auf das HMI in der Verkehrssituation des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung und anschließendem Abbiegen auf der Landstraße (Szenario 2)*

Blickverweildauern auf das HMI		Grad der Komplexität		
		<i>Situation 1 (einfach)</i>	<i>Situation 2</i>	<i>Situation 3 (komplex)</i>
Durchschnittliche Verweildauer	Mittelwert	0,63 s	0,58 s	0,55 s
	SD	0,34 s	0,22 s	0,38 s
Prozentuale Verweildauer auf das HMI	Mittelwert	22,6 %	20,9 %	15,8 %
	SD	12,3 %	10,2 %	9,3 %
Maximale Verweildauer auf das HMI		1,7 s	1,3 s	1,4 s

Die Ergebnisse in der städtischen Verkehrssituation des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel ähneln denen der Landstraßensituation (Tabelle 4-5). Die durchschnittliche Verweildauer auf das HMI ist mit 0,45 s bis 0,52 s ähnlich hoch, wie in der Landstraßensituation. Unterschiede lassen sich zwischen den einzelnen Komplexitätsstufen nicht signifikant nachweisen ( $F(1,8; 43,7) = 2,19; p = 0,13$ ). Bei der prozentualen Blickverweildauer auf das HMI gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen den Situationen ( $F(2; 50) = 8,68; p < 0,05$ ). Signifikant ist laut dem Post-hoc-Test der Unterschied von Situation 1 (einfach) zu Situation 3 (komplex). Die Werte für die prozentuale Blickverweildauer sind deutlich niedriger, als in der vorher behandelten Landstraßensituation. Auch die maximalen Verweildauern auf das HMI sind deutlich niedriger.

*Tabelle 4-5: Blickverweildauern auf das HMI in der städtischen Verkehrssituation des Rechtsabbiegens an einer roten Ampel (Szenario 6)*

Blickabwendungszeit auf das HMI		Grad der Komplexität		
		<i>Situation 1 (einfach)</i>	<i>Situation 2</i>	<i>Situation 3 (komplex)</i>
Durchschnittliche Verweildauer	Mittelwert	0,52 s	0,45 s	0,49 s
	SD	0,24 s	0,24 s	0,19 s
Prozentuale Verweildauer auf das HMI	Mittelwert	13,8 %	10,8 %	9,4 %
	SD	9,2 %	6,9 %	5,8 %
Maximale Verweildauer auf das HMI		1,0 s	0,8 s	0,9 s

Bei der Auswertung aller untersuchten Verkehrssituationen findet sich die längste prozentuale Blickverweildauer auf das HMI im einfachsten Verkehrsszenario des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf der Landstraße. Dort liegt die prozentuale Blickabwendungszeit auf das HMI in der Situation ohne jeglichen Fremdverkehr bei 30,3 %. Die kürzeste prozentuale Blickabwendungszeit mit 7,4 % wird in der städtischen Verkehrssituation mit Linksabbiegen an einer lichtsignalgeregelten Kreuzung bei vorhandenen querenden Fußgängern und anderem Fremdverkehr gemessen. Beide gerade beschriebenen Situationen mit der jeweils kürzesten als auch mit der längsten durchschnittlichen prozentualen Blickabwendungszeit sind weder die ersten noch die als letztes durchgefahrene Situationen in den Versuchsstrecken. Deswegen wird vermutet, dass die gemessenen Werte nicht hauptsächlich durch Trainingseffekte zustande kommen. Im Allgemeinen wurde beobachtet, dass vor allem die prozentuale Blickverweildauer auf das HMI immer geringer wird, je komplexer die Verkehrssituation ist.

#### **4.5 Zusammenfassung und Diskussion**

Die Studie zeigt, dass die erzielte Kraftstoffverbrauchsreduzierung durch das vorausschauende Assistenzsystem nicht von der Komplexität der Situation abhängig ist. Die in dieser Studie erzielte Verbrauchsreduktion von ungefähr 10 % entspricht in der Größenordnung den in anderen Studien erzielten gemessenen oder abgeschätzten Einsparungen zwischen 8 % (Rommerskirchen & Bengler, 2012; Popiv et al., 2010a und Bär et al., 2011) und 20 % (Krause & Bengler, 2012; Reichart et al., 1998). Die Einsparungen werden durch eine frühere Reaktion des Fahrers auf das Hindernis erzielt. Dies wird auch dadurch gezeigt, dass sich in den meisten Situationen das Nutzungsverhalten des Gaspedals signifikant ändert. Der Einfluss der Komplexität der Verkehrssituation wird deutlich in der Betrachtung des Blickverhaltens. Auch wenn keine Änderungen in der durchschnittlichen Blickdauer sichtbar sind, gibt es signifikante Änderungen in prozentualen Gesamtblickabwendungszeit von der Straße zum HMI. Je komplexer die Verkehrssituation ist desto weniger wurde auf das HMI geblickt. Trotzdem änderte sich die erzielte Kraftstoffverbrauchsreduzierung nicht.

Zusammenfassend bedeutet dies im Hinblick auf die in Kapitel 4.2 aufgestellten Hypothesen, dass Hypothese 1 und Hypothese 2 abgelehnt werden und der Hypothese 3 zugestimmt werden kann:

1. Die durch den Fahrer erzielte Kraftstoffreduzierung mit Hilfe des Fahrerassistenzsystems unterscheidet sich aufgrund der Situationskomplexität **nicht signifikant**.
2. Die Reaktionszeiten und das Reaktionsverhalten (Bremsen anstelle von Segeln) aufgrund der Situationskomplexität unterscheiden sich **nicht signifikant**.
3. Das Blickverhalten auf das HMI des Assistenzsystems ändert sich **signifikant** aufgrund der Situationskomplexität.

Dies bedeutet, dass auch in komplexen Verkehrssituationen eine Kraftstoffverbrauchseinsparung mit Hilfe dieses vorausschauenden Assistenzsystems möglich ist. Dies liegt daran, dass selbst in den getesteten komplexesten Situationen, das Assistenzsystem einfach interpretierbar bleibt. Aber, basierend auf den Änderungen des Blickverhaltens im Zusammenhang mit der Komplexität, könnte es möglich sein, wenn Situationen noch komplexer werden, als in dieser Studie, dass das Assistenzsystem nicht mehr beachtet wird. Vor allem könnte es passieren, wenn noch zusätzliche Ablenkungen hinzukommen wie durch Nebenaufgaben, zum Beispiel Telefonate, dass dann die positive Wirkung des Assistenzsystems, der verringerte Kraftstoffverbrauch, ausbleibt. Eine hohe Komplexität der Verkehrssituation alleine, ist aber in den Fällen dieser Studie, nicht ausreichend.

## 5 Langzeituntersuchungen

Bislang durchgeführte Studien zum Thema vorausschauendes Fahrverhalten hatten nicht das Ziel längerfristige Nutzung und Effekte von antizipativen Fahren zu untersuchen. Darum sollen in dieser Studie Langzeiteffekte untersucht werden. Vor allem der Prozess des Erlernens und der Akzeptanzänderung in der Phase nach der ersten Phase ist das Ziel der folgenden Studie. In dieser Studie konnten die Probanden über einen Zeitraum von drei Wochen das vorausschauende Assistenzsystem im Fahrsimulator erfahren. Ein entsprechendes Nebenziel war deshalb auch zu untersuchen, ob diese Studie auch im Fahrsimulator durchführbar ist.

### 5.1 Langzeitverhalten bei Fahrerassistenzsystemen und Kraftstoffverbrauch

Im Folgenden wird auf die Themen Akzeptanz und Lernen im Zusammenhang mit der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen eingegangen. Die zeitliche Änderung der Akzeptanz und die Erfahrung haben einen Einfluss auf die Handlung. Die Handlung ist in diesem Fall das vorausschauenden Fahren. Die folgenden Unterkapitel geben darum einen entsprechenden Überblick über die Theorie der Akzeptanz und des Lernens. Auch werden im automobilen Kontext durchgeführte Studien zum Thema Langzeitverhalten mit Fahrerassistenz und Kraftstoffverbrauch aufgezeigt.

#### 5.1.1 Lernen

Es wird vermutet, dass das Lernen wie das Fahrerassistenzsystem zu benützen ist, einen Einfluss auf das Nutzerverhalten hat. Im Folgenden wird auf die Theorie des Fähigkeitenlernens eingegangen, da der Fahrer bei Benutzung des vorausschauenden Fahrerassistenzsystems auf eine Anzeige hin eine Handlung durchführen muss. Nach Fitts & Posner (1967) existieren drei Phasen des Fähigkeitenlernens. Erstens eine frühe oder kognitive Phase, in der der Nutzer versucht die Aufgabe und was sie verlangt zu verstehen. Danach folgt eine Zwischen- oder assoziative Phase, in der das, was der Nutzer vorher gelernt hat, ausprobiert wird und neue Muster entwickelt werden. Hier werden auch die Fehler die vorher gemacht wurden, nach und nach eliminiert. In der finalen oder autonomen Phase werden die erlernten Fähigkeiten verinnerlicht und automatisiert.

Dass Lernen kein linearer Vorgang ist, konnte schon Ebbinghaus (1885) für Gedächtnisaufgaben, in diesem Fall für das Merken von Silbenreihen, zeigen. Die Geschwindigkeit mit der das Erlernen von Fähigkeiten erfolgt, wurde unter anderem von Snoddy (1926) untersucht.

Nach großen Lernerfolgen am Anfang, konnte er nach ausführlicher Praxis nur noch eine langsame Verbesserung der Fähigkeiten bei seinen Probanden messen. Er vermutete aufgrund der von ihm gewählten doppelt logarithmischen Darstellung der Daten über die Zeit (Abbildung 5-1), dass eine Potenzfunktion vorliegen muss.

$$T = BN^{-\alpha}$$

Die vorliegende Formel wurde in dieser Form von Newell & Rosenbloom (1981) für große Stichproben übernommen.  $T$  ist die benötigte Zeit beim Versuchsdurchlauf  $N$ . Die Variablen  $B$  und  $\alpha$  sind aufgabenabhängige Konstanten.  $\alpha$  ist dabei immer kleiner als 1, da es sich um Wurzelfunktionen handelt.

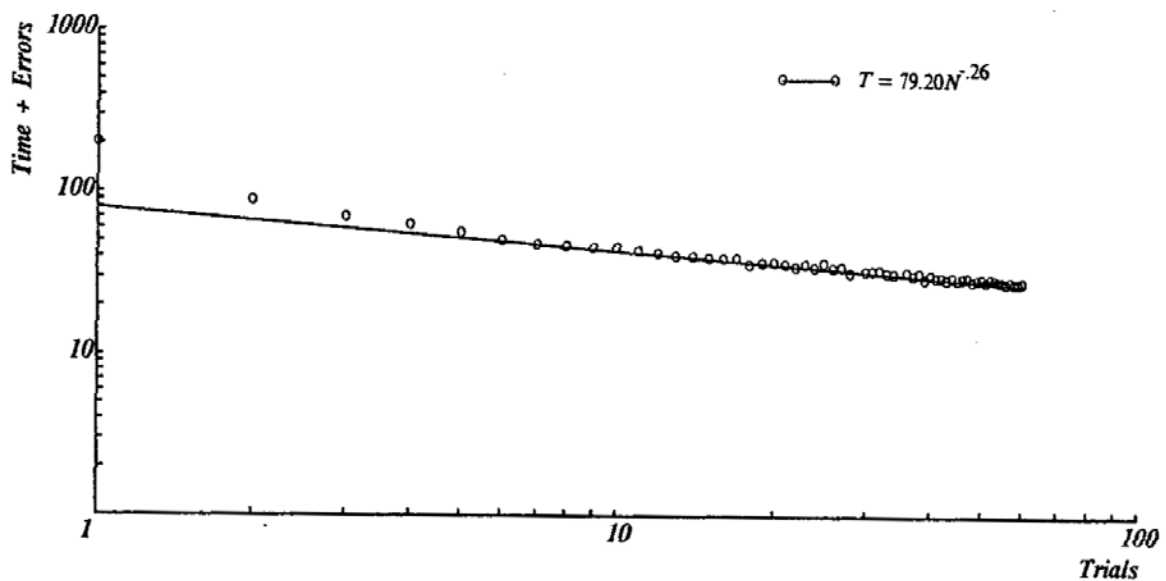


Abbildung 5-1: Lernkurve für große Stichproben auf einer doppeltlogarithmischen Skala der Versuchsreihe von Snoddy (1926); (neu gezeichnet von Newell & Rosenbloom, 1981)

Fitts & Posner (1967) behaupten, dass die Fähigkeiten sich bei weiterem Üben kontinuierlich verbessern, auch wenn dies vielleicht ab einem gewissen Zeitpunkt nur noch schwer nachweisbar ist. Eine Ausnahme von dieser Regel besteht ihrer Ansicht nach nur, wenn äußere Faktoren, wie zum Beispiel die beschränkte Geschwindigkeit einer Maschine, einen Leistungszuwachs begrenzen. Um die Lernkurve zu beschreiben werden zum Teil auch Exponential- oder hyperbolische Funktionen genutzt. Nach Newell & Rosenbloom (1981) ist aber eine erweiterte Potenzfunktion am geeignetsten, um das Erlernen von Fähigkeiten zu beschreiben. Ihr *Power Law of Practice* hat die Form:

$$T = A + B(N + E)^{-\alpha}$$

Die Variablen  $A$ ,  $B$  und  $E$  sind dabei zusätzliche Konstanten, die vor allem das Verhalten am Anfang des Lernprozesses besser beschreiben. Auch hier wird an der Formel deutlich, dass das Lernen ein kontinuierlicher Prozess ist, der erst nach unendlicher Wiederholung beendet ist. In der Realität wird ab einem gewissen Zeitpunkt eine Fähigkeitsverbesserung nicht mehr nachweisbar sein, so dass man hier ab einem gewissen Punkt von einem Ende des Lernprozesses sprechen kann. Andere Untersuchungen haben gezeigt, dass es beim Erlernen von bestimmten Fähigkeiten manchmal zu sogenannten Lernplateaus oder Stagnationsphasen kommen kann (Newell, Liu & Mayer-Kress, 2001).

Bei allen vorher beschriebenen Studien und daraus abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten muss beachtet werden, dass die Probanden gezwungen waren bestimmte Fähigkeiten zu erlernen. Bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen ist es aber meist so, dass der Fahrer die Systeme freiwillig nutzen kann. Dadurch können Studien, die sich mit dem Lernerfolg von der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen beschäftigen, auch nicht den Akzeptanzaspekt außer Acht lassen. Dies wird im folgenden Kapitel 5.1.2 behandelt.

### **5.1.2 Änderung der Akzeptanz über die Zeit**

Es „herrscht auch in der Fachliteratur der Akzeptanzforschung große Uneinigkeit über den Begriff der Akzeptanz“ (Arndt, 2011, S. 33). Entsprechend existieren verschiedene Definitionen des Begriffs Akzeptanz. Arndt (2011, S. 33–37) und Adell (2010) listen verschiedene Definitionen auf. Die Akzeptanz kann über die Einstellung definiert werden, wie zum Beispiel bei Hilbig (1984): „Akzeptanz bezeichnet eine mehr oder weniger zustimmende Einstellung eines Individuums oder einer Gruppe gegenüber einem Objekt, Subjekt oder sonstigem Sachverhalt“. Andere Definitionen beziehen die Handlungsabsicht oder die *Willingness to Use* (Adell, 2010) ein. Eine andere Kategorie von Definitionen beinhaltet das Nutzerverhalten. Speziell für Fahrerassistenzsysteme muss Akzeptanz nicht nur die Einstellung zu einem System werten, sondern auch das Nutzerverhalten beinhalten. Definitionen, die dies beinhalten stammen zum Beispiel von Arndt (2011, S. 36) „Die Akzeptanz von FAS ist über eine affektive und kognitive Bewertung hinaus mit tatsächlichen Handlungen verbunden, die sich in der konkreten Übernahme und der Nutzung des FAS manifestieren.“ Eine alternative Definition stammt von Adell (2010): „acceptance is the degree to which an individual intends to use a system and, when available, incorporates the system in his/her driving“. In dieser Arbeit wird darum sowohl versucht die Einstellung zu dem Fahrerassistenzsystem zu messen, als auch das Nutzerverhalten.

Aus der Informationstechnologie ist bekannt, dass sich Akzeptanz wie vorher definiert über die Zeit ändert. Venkatesh (2000) macht dafür vor allem die Änderung der Erfahrung (*Experience*) verantwortlich. Akzeptanz besteht demnach vor allem aus der wahrgenommenen Gebrauchstauglichkeit (*Perceived Usefulness*) und der wahrgenommenen Einfachheit der Benutzung (*Perceived Ease of Use*) (Davis, 1989). Diese beiden Metriken beeinflussen die Absicht ein System zu Nutzen (*Behavioral Intention to Use*) (Venkatesh, 2000).

Dass die Erfahrung einen großen Einfluss auf die Einstellung und damit auf das Nutzerverhalten nimmt, wird im „Technology Acceptance Model 3“ (TAM) von Venkatesh & Bala (2008) abgebildet (Abbildung 5-2). Dabei wirkt die Erfahrung (*Experience*) auf verschiedenste Aspekte, die schlussendlich das Nutzungsverhalten (*Use Behavior*) beeinflussen. Wie von Venkatesh (2000) beschrieben, dämpft die *Experience* mit der Zeit den Einfluss der *Subjective Norm* auf die *Perceived Usefulness* und auf die *Behavioral Intention*. Außerdem wird der Effekt der *Computer Anxiety* und der *Computer Playfulness* auf die *Perceived Ease of Use* aufgrund der Erfahrung mit der Zeit immer geringer. Dafür spielen die *Perceived Enjoyment* und die *Objective Usability* eine immer wichtigere Rolle je mehr *Experience* der Nutzer mit einem System hat. Basierend auf verschiedenen Erkenntnissen gehen Venkatesh & Bala (2008) davon aus, dass aufgrund größerer Erfahrungen mit dem System der Einfluss der *Perceived Ease of Use* auf die *Perceived Usefulness* mit der Zeit immer größer wird. Einer der wichtigsten Einflüsse der *Experience* ist aber der auf die Verknüpfung vom *Perceived Ease of Use* auf die *Behavioral Intention*. Je höher die Erfahrung mit dem System, desto weniger Einfluss hat die *Perceived Ease of Use* auf die *Behavioral Intention* (Venkatesh & Bala, 2008).



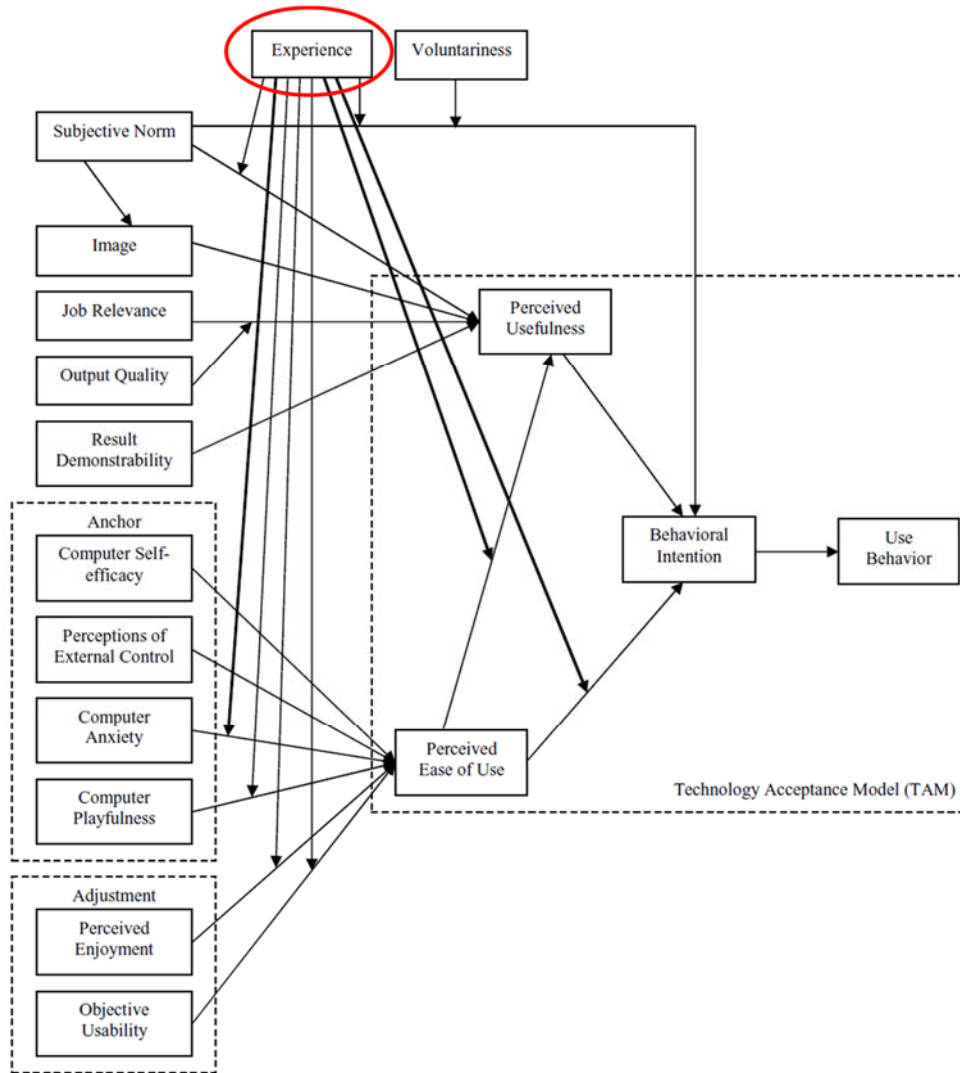


Abbildung 5-2: „Technology Acceptance Model 3“ (TAM) aus Venkatesh & Bala (2008)

Das TAM Modell erklärt insgesamt an welchen Stellen die mit der Zeit gewonnene Erfahrung auf die *Perceived Usefulness* und das Nutzerverhalten aus Akzeptanzsicht wirkt, aber nicht wie ein zeitlicher Verlauf aussehen könnte. Allerdings wird deutlich, dass die Erfahrung als sich zeitlich ändernde Variable einen großen Einfluss auf das Nutzerverhalten hat.

Im Zusammenhang von Fahrerassistenzsystemen gibt es nur sehr wenige Theorien, die sich mit der Entwicklung der Akzeptanz über einen längeren Zeitraum beschäftigen. Eine Theorie mit der Betrachtung von Akzeptanz wurde im Zusammenhang mit ACC Systemen erstellt. Winner, Barthenheier, Fecher & Luh (2003) vermuten verschiedene Phasen der Zufriedenheit. „Schon früh zeigte sich bei ersten Probefahrten ein typisches Verhalten der testenden Personen, das [sic] in der Abbildung 5-3 qualitativ illustriert ist“ (Winner et al., 2003).

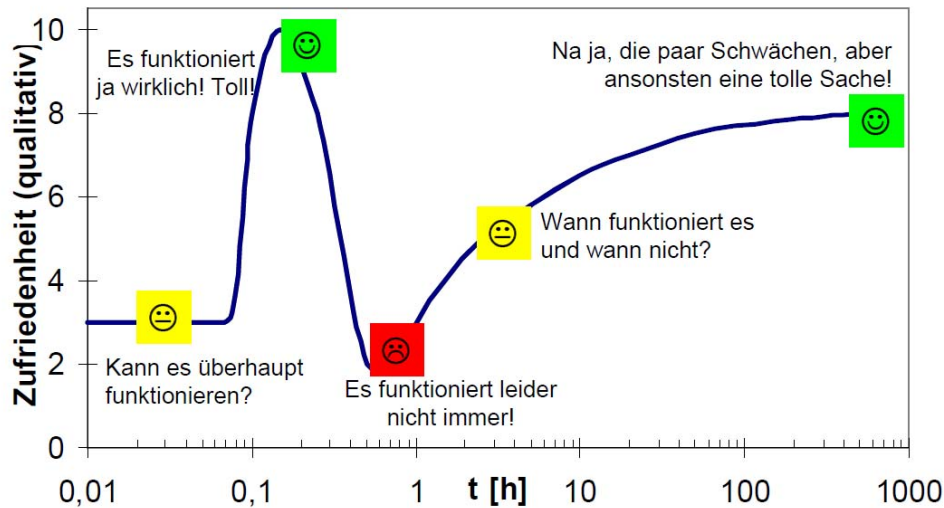


Abbildung 5-3: Qualitativer Zufriedenheitsverlauf bei einem ACC-System nach Winner et al. (2003)

Der Zufriedenheitsverlauf aus Abbildung 5-3 erinnert dabei in seiner Form und den Begrifflichkeiten an den bekannten *Gartner's Hype Cycle* (Abbildung 5-4). Dieser 1995 veröffentlichte Zyklus beschreibt die Entwicklung neuer Technologien am Markt (Fenn, 2006). Winner et al. (2003) nehmen in Ihrer Veröffentlichung allerdings keinen Bezug auf den bekannten *Hype Cycle*.

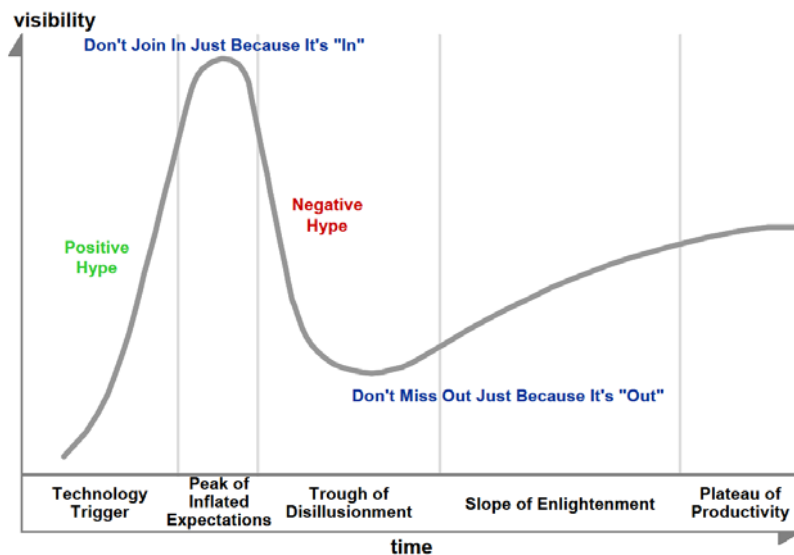


Abbildung 5-4: Gartner's Hype Cycle für neue Technologien (Fenn, 2006)

### 5.1.3 Langzeitstudien zu Fahrerassistenzsystemen

Bevor Fahrerassistenzsysteme betrachtet werden, soll kurz auf vergleichbare Studien im Bereich Fahrerinformationssysteme eingegangen werden. Dort liegt der Fokus vor allem in der

Gestaltung der Menüs und der Menüstrukturen. Hier konnte unter anderem bei Bedienfehlern und Bediengeschwindigkeiten die Gültigkeit des *Power Laws of Practice* nachgewiesen werden (Totzke, 2012). Bei Fahrerassistenzsystemen ist der Erfolg der Bedienung nicht so einfach messbar, da bei der Nutzung eines Fahrerassistenzsystems das Fahrverhalten beeinflusst wird. Hier ist häufig ein Vergleich von nicht-assistiertem und assistiertem Fahren nötig. Auch Bengler (2007) stellt fest, dass die Untersuchung von Lernprozessen und das individuelle Verhalten bei der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen deutlich größere Anstrengungen verursacht, als bei Fahrerinformationssystemen.

Langzeitstudien zu Fahrerassistenzsystemen gibt es, wegen des hohen Aufwands solch eine Studie durchzuführen, kaum. Langzeitstudien existieren unter anderem zum aktiven Gaspedal zur Geschwindigkeitsregelung (zum Beispiel Adell & Várhelyi, 2008 und Várhelyi, Hjälm Dahl, Hydén & Draskóczy, 2004), zu lateralen Assistenzsystemen, wie dem Lane Departure Warning (Sanchez et al., 2012) und zum ACC. Im Folgenden werden einige Beispielstudien zum ACC vorgestellt. Dafür sprechen folgende Gründe. Ein ACC-System unterstützt den Fahrer bei der longitudinalen Fahraufgabe und es kann freiwillig genutzt werden, es herrscht kein Zwang das System zu Nutzen. Auch ein vorausschauendes Assistenzsystem unterstützt den Fahrer in der longitudinalen Fahraufgabe und ist freiwillig. Allerdings beeinflusst ein ACC aktiv die Längsführung und der Nutzer muss das System im aktiven Zustand überwachen. Vorteilhaft ist, dass es zum ACC eine Reihe von Langzeitstudien mit unterschiedlichen methodischen Vorgehensweisen gibt.

Im Folgenden soll beispielhaft an den Arbeiten von Simon (2005), Weinberger (2000) und Beggiano, Pereira, Petzoldt & Krems (2015) gezeigt werden, wie sich die Nutzung über die Zeit in den ersten paar Wochen ändert. Im Vergleich dazu sollen dazu die Erkenntnisse aus dem euroFOT-Projekt wiedergegeben werden, in welchem unter anderem ACC-Systeme über einen Zeitraum von mehreren Monaten betrachtet wurden (Sanchez et al., 2012).

Weinberger (2000) untersuchte das Fahrverhalten von ACC-Systemen in einem Feldversuch mit 15 Probanden über einen 4-wöchigen Zeitraum. Dabei interessierte ihn unter anderem das Lernverhalten. Dazu benutzte er sowohl Realfahrdaten und -beobachtungen, als auch wöchentliche Befragungen von Probanden. Als Besonderheit muss erwähnt werden, dass alle Probanden Vielfahrer waren, die im Schnitt 1400 km pro Woche fuhren. Zwei Fragen bezüglich des Lernverhaltens untersuchte er dabei. Erstens wurde nach dem Verständnis der Anzeige- und Bedienelemente gefragt. Nach zwei Wochen konnte er keine Unterschiede mehr nachweisen. Zweitens interessierte ihn die Einschätzung von Übernahmesituationen, in denen

der Fahrer vom ACC-System wieder die Längsführungsaufgabe übernehmen musste. Dabei zeigte sich auch hier nach ungefähr zwei bis drei Wochen ein stabiles Verhalten (Abbildung 5-5). Auch die Fahr- und Beobachtungsdaten deuten auf Lerndauer von ein bis zwei Wochen hin (Weinberger, Winner & Bubb, 2001). Zusammenfassend wird anhand der vorliegenden Daten mit diesem System von einer Lerndauer von zwei Wochen ausgegangen, in der deutliche Verhaltensänderungen zu beobachten sind.

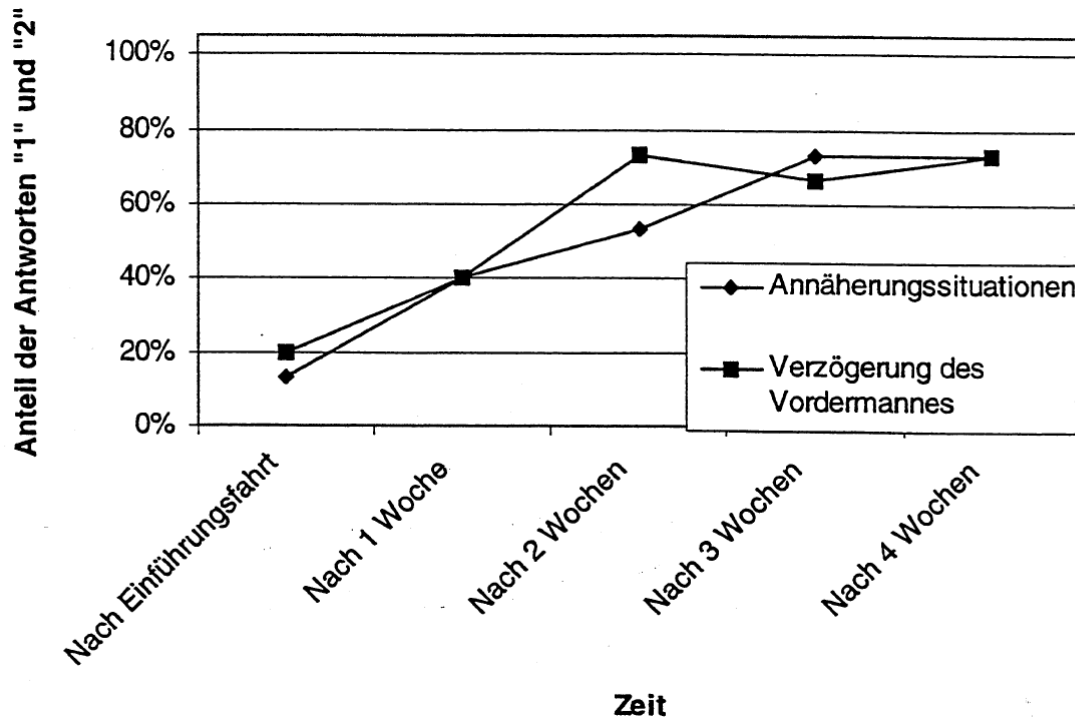


Abbildung 5-5: Prozentsatz der Probanden, denen es leicht oder sehr leicht (Antwort „1“ oder „2“) fällt Annäherungssituationen oder Verzögerungen des Vordermannes im Zusammenhang mit ACC einzuschätzen. (aus: Weinberger, 2000, S. 71)

In der ähnlich aufgebauten explorativen ACC-Feldstudie von Simon (2005) mit 5 Probanden über zweieinhalb Wochen wurde neben ähnlichen Fragen zum Akzeptanzverlauf wie bei Weinberger (2000) unter anderem auch die Nutzungsfrequenz untersucht. Im Gegensatz zu Weinberger (2000) wurden die Probanden erst nach dem Versuchszeitraum zu Systemverständnis und Akzeptanz befragt. Dabei wurde von den meisten Probanden angegeben, dass sie sich nach ca. 2-3 Tagen an das System gewöhnt hatten. Wie auch schon von Beggiato et al. (2015) angemerkt, ist diese Aussage aufgrund der retrospektiven Betrachtung und der kleinen Stichprobengröße mit Vorsicht zu betrachten. Interessant ist die Betrachtung der Nutzungsfrequenz des ACCs zu verschiedenen Zeitpunkten während des Versuchs. Es gab Nutzer, die das

System anfangs intensiv nutzten und im Verlauf der Zeit Nutzungsdauer ein Stück weit reduzierten, aber auch einen Nutzer, der sehr vorsichtig anfing und seine Nutzung im Laufe der Zeit steigerte (Simon, 2005, S. 84). Im letzten Versuchsviertel erreichten aber alle Nutzer eine ausbalancierte, fahrerspezifisch bevorzugte optimale Nutzungsfrequenz (Kopf & Simon, 2001).

Unter anderem die Entwicklung des Lernprozesses und den Verlauf der Akzeptanz für ACC untersuchten Beggiato et al. (2015) und Pereira, Beggiato & Petzoldt (2015) mit Hilfe einer Realfahrstudie. Im Gegensatz zu den vorherigen Studien fuhren die 15 Probanden nicht kontinuierlich mit dem Versuchsfahrzeug, sondern wurden über einen 2-monatigen Zeitraum zu jeweils 10 Versuchsfahrten auf der gleichen Versuchsrouten eingeladen. Durch diese Vorgehensweise konnte die Änderungen leichter verglichen werden, da die Bedingungen und die zeitlichen Abstände immer gleich waren. Die Akzeptanz und der Lernerfolg wurden über Befragungen nach jeder Versuchsfahrt erhoben (Beggiato et al., 2015). Parallel wurde die Nutzung des ACC-Systems aufgezeichnet (Pereira et al., 2015). Durch die für einen Realversuch sehr stark kontrollierte Versuchsumgebung und die äquidistanten Zeitpunkte der Datenerhebung, können die gemessenen Fortschritte sehr gut ausgewertet werden. Beggiato et al. (2015) wendeten auf ihre Ergebnisse der Fragebogenstudie von Akzeptanz und Lernen aufgrund der Lerntheorien, die in Kapitel 5.1.1 beschrieben, Power-Law-Funktionen an. Abbildung 5-6 zeigt dies am Beispiel für die Entwicklung der Akzeptanz gemessen mit Hilfe des Fragebogens von Laan, Heino & Waard (1997). Sowohl bei der Akzeptanz als auch für das Lernen fällt auf, dass vor allem die erste Fahrt abweicht und dass generell ab der fünften Fahrt eine Stabilisierung der Lernkurven erreicht wird. Ein Zwischenzeitliches Absinken der Akzeptanz, wie von Winner et al. (2003) beschrieben (vgl. Kapitel 5.1.2) wird von den Autoren explizit ausgeschlossen (Beggiato et al., 2015). Die Nutzungsrate hingegen hatte nur zum Teil einen ansteigenden Verlauf. Im urbanen Umfeld konnte eine signifikante Steigerung der Nutzungsrate nachgewiesen werden (Pereira et al., 2015).

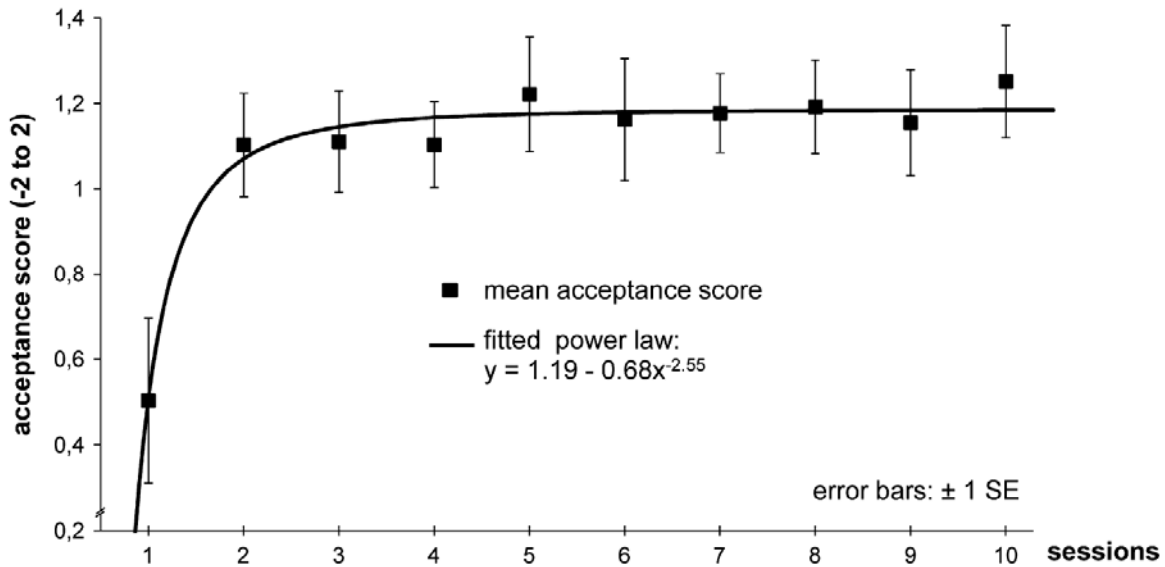


Abbildung 5-6: Entwicklung der ACC-Akzeptanz und angepasste Power-Law-Funktion aus der Veröffentlichung von Beggiato et al. (2015)

Eine ganz andere Untersuchungsmethode nutzte das euroFOT-Projekt (Sanchez et al., 2012). Im von der EU geförderten Projekt wurde unter anderem auch der Frage nach der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen nachgegangen. Insgesamt wurden Field Operational Tests mit fast 1000 Fahrzeugen über ein Jahr durchgeführt, aufgeteilt in einen 3-monatigen Baseline-Zeitraum ohne Assistenzsysteme und einen 9-monatigen Zeitraum mit Assistenzsystemnutzung. Speziell wurde bei den Assistenzsystemen nach der Akzeptanz von ACC-Systemen gefragt. Dafür wurde der Fragebogen nach Laan et al. (1997) eingesetzt. Die Probanden mussten die Fragebögen zu drei Zeitpunkten ausfüllen: Einmal vor dem Nutzungszeitraum, einmal in der Mitte und einmal zum Ende des Nutzungszeitraums von insgesamt neun Monaten. Dabei konnte eine insgesamt hohe Akzeptanz des ACCs festgestellt werden. Es konnten auch keine signifikanten Unterschiede der Akzeptanz zwischen den drei Zeitpunkten festgestellt werden. (Sanchez et al., 2012)

Beim euroFOT-Projekt wurden allerdings aufgrund der Befragung im Abstand von jeweils ca. vier Monaten, mögliche anfängliche Akzeptanzänderungen, wie von Winner et al. (2003) beschrieben nicht aufgenommen. Genauso kann aufgrund der zu geringen Datenlage keine Power-Law-Funktion analog zu Beggiato et al. (2015) aufgestellt werden.

Insgesamt wurden in den vorgestellten Studien verschiedene Methoden der Langzeituntersuchungen genutzt. Simon (2005) und Weinberger (2000) setzten auf eine genaue Beobachtung der Fahrer, Aufzeichnung des Fahrverhaltens und regelmäßigen Befragungen bei

ansonsten freier Fahrt. Dadurch kommt es aufgrund der unterschiedlichen aber dafür realistischen Bedingungen, wie nicht gleiches Fahrprofil, unterschiedlich viel gefahrene Kilometer etc. zu möglichen Auswertungsfragmenten, da die Probanden zu unterschiedlichen Erfahrungszeitpunkten befragt werden, wenn die Befragungen zu zeitlich festgesetzten Punkten erfolgen. Dieses Problem umgingen Beggiato et al. (2015) indem sie eine feste Route vorgaben und alle Probanden regelmäßig diese Route befahren ließen und sie immer abschließend befragten. Die euroFOT-Studie (Sanchez et al., 2012) fällt in diesem Fall aus dem Rahmen, da die Zeiträume zwischen den Befragungen sehr lang waren. Aus den Studien lassen sich folgende Ergebnisse ableiten. Die Nutzung und Akzeptanz von ACC-Systemen ist am Anfang etwas geringer. Sowohl die Akzeptanz, der Lernerfolg als auch die Nutzungsrate nimmt im Laufe der ersten ein bis zwei Wochen oder innerhalb der ersten fünf Fahrten messbar zu und wird dann nicht mehr erkennbar gesteigert oder verringert sich auch über einen Zeitraum von mehreren Monaten. Eine zwischenzeitliche Verringerung der Akzeptanz kurz nach dem ersten Kontakt mit dem ACC-System, dem sogenannten „Tal der Tränen“ (Winner et al., 2003), ist in den Studien nicht zu erkennen. Insgesamt wurden alle Studien durchgeführt zu einem Zeitpunkt an dem das Fahrerassistenzsystem schon in einem Realfahrzeug existierte. Zum Teil auch schon zu einem Zeitpunkt an dem die Systeme schon eine längere Zeit auf dem Markt waren. Es sind keine Studien bekannt welche schon im frühen Entwicklungsprozess oder im Erforschungsstadium Langzeitauswirkungen untersucht haben. Das heißt die Systeme wurden im Nachgang validiert.

#### **5.1.4 Langzeitstudien zum Kraftstoffverbrauch**

Da es keine bekannten Langzeitstudien zum antizipativen Fahren mit Hilfe eines Fahrerassistenzsystems zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs gibt, soll im Folgenden auf Langzeiteffekte auf den Kraftstoffverbrauch eingegangen werden. Vorgestellt werden einige Studien, die die Langzeitwirkung von Trainingsmaßnahmen zum effizienten Fahren oder die Systeme zur Rückmeldung des aktuellen Kraftstoffverbrauchs betrachten. Alle vorgestellten Studien wurden im Realverkehr durchgeführt.

Eine der größten und ersten Langzeitstudien wurde von Wählberg (2007) durchgeführt. Er untersuchte den Erfolg eines ecoTrainings und einer aktuellen Verbrauchsanzeige bei angestellten Busfahrern im schwedischen Uppsala. Fast 250 Busfahrer bekamen ein einheitliches initiales professionelles ecoTraining. Danach wurde das Verbrauchsverhalten über mehrere Monate aufgezeichnet und mit nichttrainierten Fahrern verglichen. Zusätzlich wurden in einen kleinen Teil der Busflotte noch Geräte eingebaut, welche Rückmeldung über den aktuellen Kraftstoffverbrauch und aktuelle Fahrdaten geben. Ergebnis dieses Großversuches war, dass das

ecoTraining nur einen kleinen positiven Einfluss von ca. 2 % auf den Kraftstoffverbrauch hat. Die Verbrauchsrückmeldung wiederum hat einen kleinen positiven Effekt von ca. 3 % -4 %. Aus der Studie wird allerdings nicht deutlich, wie sich der Verbrauch über die Zeit entwickelt. Generell können die Ergebnisse der Studie qualitativ auf den PKW-Bereich übertragen werden, wenn berücksichtigt wird, dass es sich bei den Probanden in diesem Versuch um Berufskraftfahrer handelt und dass es sich hier um einen städtischen Verkehrsraum mit Linienbussen handelt.

Eine ähnliche Langzeitstudie mit 118 Fahrern mit verschiedenen HMIs, welche verschiedene Kombinationen und Anzeigevarianten vom aktuellen Kraftstoffverbrauch, vom Kraftstoffverbrauch der aktuellen Fahrt und zum Teil die aktuellen Beschleunigungen anzeigen, wurde von Kurani et al. (2013) durchgeführt. Die Probanden aus dem Westen der USA fuhren in Ihren eigenen Privat-PKWs einen Monat ohne HMI und einen Monat mit einer ausgewählten HMI-Variante. Das Ergebnis war, dass im Schnitt 2,7 % Kraftstoff eingespart wurden. Auch hier wurde weniger das Lernverhalten betrachtet, sondern der Fokus auf valide Langzeitnutzungsdaten gelegt.

Eine Langzeitstudie, die sich mit dem zeitlichen Verlauf des Kraftstoffverbrauchs nach einem ecoTraining beschäftigte, wurde von Beusen et al. (2009) mit dem Korrigendum von Degraeuwe & Beusen (2013) veröffentlicht. Es wurden die Daten von zehn Probanden sechs Monate vor und sechs Monate nach einem professionellen ecoTraining aufgezeichnet. Dabei wurden die Daten wöchentlich ausgewertet. Auch wenn keine signifikante Verbrauchsminde- rung über die Zeit nachgewiesen werden konnte (Degraeuwe & Beusen, 2013), sind die zeitlichen Entwicklungen des Kraftstoffverbrauchs interessant, da kein einheitlicher Verlauf über alle Probanden festgestellt werden konnte. Bei einigen Probanden war zum Beispiel der Effizienzgewinn direkt nach dem Ecotraining am höchsten und verschlechterte sich über die nächsten Wochen wieder, bei anderen wurden die Kraftstoffeinsparungen über die Zeit immer höher (Abbildung 5-7). Hier zeigt sich, dass ein einzelnes Training keine durchgängigen dauerhaften Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch hat.



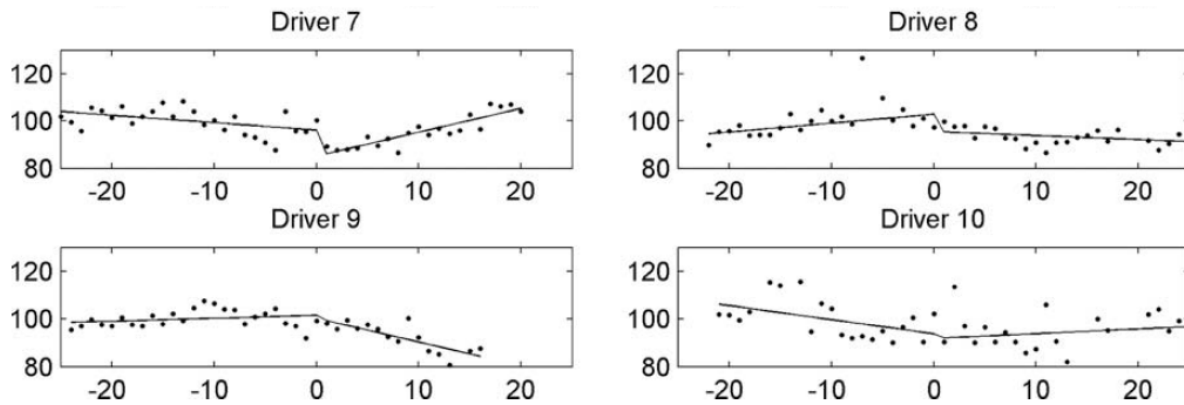


Abbildung 5-7: Wöchentlicher ( $x$ -Achse) Kraftstoffverbrauchsverlauf in % ( $y$ -Achse) einiger Probanden vor und nach dem Ecotraining (Zeitpunkt 0) aus der Studie von Beusen et al. (2009); (Auszug)

Eine Studie, die sich mit dem Erlernen von ökologischem Fahren beim Befahren von Steigungen und Gefällen beschäftigt, wurde von Jamson, Hibberd & Jamson (2015) durchgeführt. Die Probanden sollten mit drei verschiedenen Assistenzsystemen (visuell, zwei haptische Gaspedalvarianten) mit möglichst konstanter Geschwindigkeit auf Autobahnen Hügel auf und abfahren. Der Versuch wurde viermal hintereinander in einem Fahrsimulator durchgeführt (Baseline und Fahrten mit Assistenzsystem). Geprüft wurde, ob sich durch die dreifache Wiederholung durch ein assistiertes Fahren, das Gaspedalverhalten ändert. Dies konnte nicht nachgewiesen werden. Problematisch ist, dass die nur dreimaligen Wiederholungen mit unterschiedlichen Assistenzsystemen durchgeführt wurden. Außerdem handelte es sich bei dem Assistenzsystem um eine direkte Anweisung wie das Gaspedal betätigt werden muss, um die Geschwindigkeit konstant zu halten. Gemessen wurde dabei nur die Variabilität in der Gaspedalbetätigung. Insgesamt kann auch nach dreimaliger Fahrt mit einem Assistenzsystem noch nicht von Langzeitversuchen gesprochen werden.

Zusammenfassend war das Ziel bei den Studien von Wählberg (2007) und Kurani et al. (2013), die Untersuchung, ob es Effekte gibt, die auch über einen längeren Zeitraum stabil bleiben. Bei Beusen et al. (2009) wurde zusätzlich noch der zeitliche Verlauf betrachtet. Insgesamt bleibt die Datenlage bei Langzeitstudien vor allem auf die Effekte von Trainingsmaßnahmen (Wählberg, 2007; Beusen et al., 2009) und einfachen Ecoassistenzsystemen (Wählberg, 2007; Kurani et al., 2013), basierend auf aktuellem Verbrauchsverhalten, beschränkt. Alternativ gibt es noch die Studie von Jamson et al. (2015), die sich auf drei Versuche hintereinander beschränkt, aber hier keine signifikanten Unterschiede zwischen den Wiederholungen feststellen konnte.

Im Unterschied zu Trainingsmaßnahmen hat ein Fahrerassistenzsystem eine andere Wirkung auf den Fahrer. Im Idealfall wird mit dem Fahrerassistenzsystem kontinuierlich gelernt. Außerdem kann eine sofortige Rückmeldung über das umgesetzte Verhalten erfolgen. Auch ist bei einem Fahrerassistenzsystem ein Lernprozess durch die wiederholte Nutzung möglich.

## **5.2 Methodik von Langzeitstudien**

Langzeitstudien zur Bewertung von Fahrerassistenzsystemen zum vorausschauenden Fahren sind bislang nicht aufzufinden. Langzeitstudien zu Fahrerassistenzsystemen im Allgemeinen wurden bislang auch, soweit bekannt, nur unter Realbedingungen durchgeführt. Hier gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Alternativ ist es eine Überlegung, Langzeitstudien auch im Fahrsimulator durchzuführen. Dazu gibt es allerdings keine bekannten Beispiele. Warum dies trotzdem zielführend sein kann, wird später in diesem Kapitel erörtert werden.

### ***5.2.1 Langzeitstudien unter Realbedingungen***

Bislang wurden Langzeitstudien in Realfahrzeugen hauptsächlich als Field Operational Test (FOT) oder als Naturalistic Driving Study (NDS) durchgeführt. Eine NDS besitzt nach der Definition aus dem Prologue-Projekt (Sagberg et al., 2011, S. 19) folgende Eigenschaften. Sie zeichnet Fahrdaten und den Fahrer unauffällig auf. Es gibt keinen Beobachter im Fahrzeug und der Proband fährt normal ohne Einschränkungen für seine Ziele in seinem üblicherweise genutztem PKW. Ein FOT ist definiert als

“A study undertaken to evaluate a function, or functions, under normal operating conditions in road traffic environments typically encountered by the participants using study design so as to identify real world effects and benefits.” (FOT-NET, 2014, S. 1)

Eine NDS legt den Fokus normalerweise auf die Untersuchung von Faktoren, die zum Unfall führen. Im Gegensatz dazu liegt der Fokus beim FOT in der Bewertung von Systemen und Funktionen. Trotzdem gibt es methodische Gemeinsamkeiten, obwohl die Untersuchungsziele unterschiedlich sind, zwischen einem FOT und einer NDS. (FOT-NET, 2014)

Die in den beiden vorherigen Kapiteln vorgestellten Studien reichen von NDS-Studien (Beusen et al., 2009) bis zu den in der Mehrheit vertretenen FOT-Studien. Darunter sind sowohl große Studien über lange Zeiträume vertreten, wie die euroFOT-Studie (Sanchez et al., 2012) oder von Wählberg (2007), als auch über kürzere Zeiträume (Kurani et al., 2013) mit zum Teil nur kleinen Probandengruppen (Weinberger, 2000 oder Simon, 2005). Ein Problem beim FOT

ist, dass FOTs größere Projekte sind und darum sehr aufwendig und teuer (FOT-NET, 2014, S. 8). Speziell in der Datenauswertung und Erfassung muss sehr koordiniert mit hohem Aufwand vorgegangen werden. Das Ziel einer Untersuchung mit FOTs, wie es auch aus der oben genannten Definition hervorgeht, liegt vor allem im Aspekt Effekte zu finden, die durch die reale Umwelt beeinflusst werden. Ein FOT ist nicht primär darauf ausgelegt zeitliche Veränderungen zu erfassen. Dadurch, dass jeder Proband ein eigenes Fahrprofil hat und nicht jeder nach einer gewissen Zeit oder gewissen Distanz, die gleichen Situationen erlebt hat, sind Lernprozesse schwer zu quantifizieren. Die vorher vorgestellte Arbeit von Beggiato et al. (2015) zeigt eine Alternative. Durch eine Wiederholung der immer gleichen Strecke kann der Lernvorgang sehr gut erfasst werden.

Zusammenfassend ist der Vorteil von FOT der, dass ein System in der Realität in typischen Situationen getestet werden kann. Nachteilig ist, dass ein entsprechender Lernprozess nicht erfasst werden kann, da nicht gesteuert wird wie oft ein System in bestimmten Situationen genutzt wird. Zur Erfassung der Entwicklung des Langzeitverhaltens bietet sich deswegen eher das Vorgehen von Beggiato et al. (2015) und Pereira et al. (2015), die die Probanden wiederholt unter annähernd gleichen Bedingungen fahren ließen.

### ***5.2.2 Unterschiede zwischen Fahrstudien und Realfahrzeugstudien***

Studien im Fahrstudien werden schon seit längerem zur Erforschung von Fahrerassistenzsystemen eingesetzt. In der Übersicht von Winter et al. (2012) werden als Vorteile von Untersuchungen im Fahrstudien die Kontrollierbarkeit, die Reproduzierbarkeit, die Standardisierung von Experimenten, die einfache Möglichkeit der Datenaufzeichnung und die Möglichkeit kritische Situationen sicher zu untersuchen, genannt. Außerdem können Untersuchungen von neuen Systemen zu einem Zeitpunkt durchgeführt werden zu dem das Fahrzeug mit neuer Hardware noch gar nicht zur Verfügung steht (Bubb, 2015b). Ein Problem beim Fahrstudien ist, dass es bei Probanden teilweise zur Simulatorkrankheit kommt. Dies äußert sich zum Teil in Übelkeit, Schwindelgefühl und ähnlichem und führt normalerweise zum Abbruch des Experiments oder mindestens zum Aussondern der Daten, da das Fahrverhalten beeinflusst wird. Es sind verschiedene Faktoren, die die Simulatorkrankheit begründen, die zum Teil durch den Simulator und zum Teil durch das Versuchsdesign beeinflusst werden können (Stoner, Fisher & Mollenhauer, 2011).

Wichtig ist, dass Ergebnisse aus den Fahrstudienexperimenten für die jeweilige Fragestellung, übertragbar auf die Realität sind. Ein wichtiger Aspekt ist die Validität des Fahrerhaltens in Fahrstudien. Es wird dabei in der Literatur zwischen der absoluten und

relativen Validität unterschieden (u. a. Bubb, 2015b; Negele, 2007; Kaptein, Theeuwes & Horst, 1996; Mullen, Charlton, Devlin & Bédard, 2011). „Absolute Validität ist durch die qualitative und quantitative Übereinstimmung der zur Beschreibung des Fahrverhaltens herangezogenen Parameter zwischen Simulator- und entsprechenden Echtversuchen gekennzeichnet“ (Bubb, 2015b, S. 599). Relative Validität liegt vor, wenn die Unterschiede der zu vergleichenden Fahrdaten, im Simulator und in der Realität die gleiche Größenordnung und Tendenz besitzen (Blana, 1996b). Eine absolute Validität konnte, von wenigen Ausnahmen abgesehen (Blaauw, 1982), weder für die Geschwindigkeitswahl, noch für die laterale Positionierung, basierend auf den Literaturrecherchen und Untersuchungen von Blana (2001), Negele (2007) und Mullen et al. (2011), nachgewiesen werden. Als Beispiel für den Beweis der relativen Validität können für das Geschwindigkeitsprofil in Verzögerungssituationen die Untersuchungen zur Validität von Godley, Triggs & Fildes (2002) betrachtet werden. Es wurde das Verhalten vor Kreuzungen mit Rüttelstreifen betrachtet. Im Vergleich von Simulation und Realfahrten, konnte ein ähnliches Verzögerungsverhalten beobachtet werden. Allerdings war die allgemeine Geschwindigkeit in der Fahrsimulation höher, was auch Bubb (2015b) aus seiner eigenen Erfahrung berichtet. Speziell für den Kraftstoffverbrauch konnten auch Rommerskirchen et al. (2012) nachweisen, dass eine relative Validität existiert. Erkenntnisse zur Validität von Fahr Simulatorversuchen müssen allerdings unter dem Gesichtspunkt betrachtet werden, dass sie immer nur für den jeweiligen Simulator gelten. Erst, wenn diese in verschiedenen Simulatoren gewonnen wurden, können Ergebnisse verallgemeinert werden. In den Arbeiten von Mullen et al. (2011) und Zöller (2015) sind tabellarisch verschiedene Studien und allgemeine Erkenntnisse aufgelistet. Die relative Validität kann für viele Fahr Simulatoren für die folgende Verhaltensparameter, Geschwindigkeit, Positionshaltung, Blickverhalten und Reaktionszeiten nachgewiesen werden (Mullen et al., 2011; Zöller, 2015). Abweichend werden im Fahr Simulator in der Tendenz etwas höhere Geschwindigkeiten gemessen (Zöller, 2015), die Variabilität in der Spurführung ist tendenziell größer und der mentale Aufwand um die Fahraufgabe durchzuführen ist in der Tendenz auch etwas höher (Jamson, 2011). Die meisten Validierungsstudien wurden an großen statischen oder dynamischen Fahr Simulatoren durchgeführt und sind entsprechend nur für solche Systeme generalisierbar.

Kritisch zu hinterfragen ist, dass bei den meisten Validierungsstudien keine deutlichen Aussagen zum Erfahrungszustand der Probanden bei der Nutzung des Fahr Simulators gemacht werden. Da alle Fahr Simulatoren eine Abweichung zur Realität besitzen, sollten Lernprozesse

der Probanden bei der Nutzung des Fahrsimulatorsystems mitberücksichtigt werden. Unerfahrene Simulatornutzer zeigen ein anderes Fahrverhalten. Entsprechend sind Simulatoreinführungsprogramme notwendig und werden angewendet (Hoffmann & Buld, 2006). Allerdings sind selbst nach einer Eingewöhnung noch Abweichungen zu sehr erfahrenen Nutzern zu erwarten.

Die Güte der relativen Validität der Fahrverhaltensparameter, ist nicht für jeden Fahrsimulator gleich. Die Validität hängt vom tatsächlichen Aufbau des Systems ab. Typischerweise werden Simulatoren wie bei Blana (1996a) anhand des finanziellen Aufwands kategorisiert. Ein Fahrsimulator kann dabei schon ein einfaches PC-System mit einem Joystick sein (Carsten & Jamson, 2011) oder ein einfaches an einem PC angeschlossenes Lenkrad mit einem einfachen Monitor, wie es zum Beispiel für den Lane Change Task vorgeschrieben ist (ISO 26022). Die wichtigsten Qualitätskriterien sind nach Carsten & Jamson (2011) neben dem Punkt, ob der Fahrsimulator ein bewegtes System ist, das Visualisierungssystem (z. B. Auflösung, Größe der Projektionsfläche), die Simulationsverzögerung durch die Berechnung, die Szenengestaltung (z. B. Anzahl der Objekte, grafische Umsetzung), das Fahrzeugdynamikmodell, die Fahrer-Fahrzeugschnittstelle (z.B. Joystick, einfaches Mockup oder komplettes Realfahrzeug) und die Soundsimulation. Im Einzelnen gilt je besser die einzelnen Qualitätsmerkmale sind, desto höher ist der Immersionsgrad für den Fahrer und desto eher wird es zu einem validen Fahrverhalten kommen. Quantitative Aussagen oder Mindeststandards, die helfen eine gewisse Validität zu garantieren, sind nur für wenige Einzelaspekte vorhanden. Speziell für die technische Umsetzung der Visualisierung gibt es einige Parameter, wie ein Gesichtsfeld von mindestens 120° für ein kontrollierteres Bremsen, basierend auf Erkenntnissen aus Untersuchungen (Kaptein et al., 1996). Ein anderer Parameter ist die optimale Mindestauflösung von 2-3 Bogenminuten/Pixel, aufgrund der menschlichen Sehschärfe (Bubb, 2015b).

Insgesamt hat der Fahrsimulator neben den Vorteilen wie Kontrollierbarkeit, Reproduzierbarkeit, Nutzung zu einem frühen Entwicklungszeitpunkt und der Standardisierung von Experimenten, den Nachteil nicht immer absolute Validität zur Realität zu bieten. Trotzdem ist der Fahrsimulator geeignet, aufgrund der häufig bewiesenen relativen Validität, sehr gute Aussagen über Tendenz und Größenordnungen von Verhaltensänderungen im Rahmen der Bewertung von Fahrerassistenz zu treffen.

Für die Langzeituntersuchung des vorausschauenden Fahrerassistenzsystems, müssen folgende Aspekte des Fahrsimulators beachtet werden. Wichtig ist das Fahrzeugdynamikmodell, welches für den Fahrer gut einschätzbar sein muss, damit er zum vom ihm kalkulierten

Zeitpunkt ausrollen oder bremsen kann. Die Auflösung muss so gut sein, dass der Fahrer in der Lage ist antizipationsrelevante Merkmale zu erkennen. Zusätzlich muss eine Umsetzung des Assistenzsystems in der Simulation möglich sein. Da die Spurführung, das Abbiegeverhalten und das Ausweichverhalten nicht Gegenstand der Untersuchung sind, können Abstriche in der Lenksimulation gemacht werden. Darum kann auch auf seitliche Projektionen verzichtet werden.

### 5.3 Ziele der Langzeitstudie

Basierend auf der Tatsache, dass es bislang keine bekannte Langzeituntersuchungen gibt, die das durch ein Assistenzsystem unterstützte vorausschauende Fahren zur Kraftstoffverbrauchsreduzierung betrachten, soll solch eine Studie durchgeführt werden. Das Ziel ist zu untersuchen, ob ein Fahrerassistenzsystem zum vorausschauenden Fahren auch einen anhaltenden positiven Effekt hat. Änderungen des Langzeitverhaltens können durch das Lernen (vgl. Kapitel 5.1.1) und die Änderung der Akzeptanz (vgl. Kapitel 5.1.2) erfolgen. Ein Nebeneffekt des Assistenzsystems kann auch sein, dass die Probanden erlernen und auch motiviert werden, kontinuierlich vorausschauender zu Fahren. Dies kann dazu führen, dass auch auf späteren Fahrten ohne Unterstützung positive Effekte gemessen werden können.

Aus den vorher genannten Punkten ergeben sich für diese Studie entsprechend folgende Untersuchungsfragen:

- Wie ändert sich die Akzeptanz des genutzten vorausschauenden Fahrerassistenzsystems über die Zeit?
- Ändert sich der Kraftstoffverbrauch bei Fahrten mit dem Fahrerassistenzsystem über die Zeit?
- Beeinflusst das Assistenzsystem bei längerer Nutzung auch den Kraftstoffverbrauch bei Fahrten ohne Assistenzsystem?

Ein Ziel ist es auch Langzeituntersuchungen durchzuführen ohne dieses System schon in ein Realfahrzeug integriert zu haben. Die Studie soll im Gegensatz zu den in Kapitel 5.1.3 und 5.1.4 vorgestellten Langzeituntersuchungen in einem kleinem Fahrsimulatorsystem erfolgen. Da es mit dieser Methodik bislang aber keine vergleichbaren Studien gibt, wird zusätzlich zu den Untersuchungsfragen zum Langzeitverhalten noch eine methodische Untersuchungsfrage aufgenommen, basierend auf den bisherigen Erkenntnissen zu Simulatorversuchen und deren Validität aus Kapitel 5.2:

- Ist der genutzte Versuchsaufbau mit einem kleinen Fahrsimulator in Relation zum in Kapitel 4 genutzten Fahrsimulator valide?

Als betrachteter Zeitraum werden dabei ca. zwei bis drei Wochen wiederholter Nutzung des Fahrerassistenzsystems. Dies basiert auf den Erkenntnissen von Simon (2005) und Weinberger (2000), die nach zwei Wochen ein konstantes Nutzungsverhalten in ihren Studien beobachten konnten. Der Versuchsaufbau mit zwölf Fahrten mit dem Fahrerassistenzsystem ähnelt dem von Beggiato et al. (2015) und Pereira et al. (2015). Aus den vorher genannten Forschungsfragen ergeben sich dann folgende Hypothesen für die Versuche:

1. Es ergeben sich Änderungen im Fahrerakzeptanzfragebogen nach Laan et al. (1997).
2. Es ergeben sich Änderungen im Fahrverhalten über den Versuchszeitraum, die Rückschlüsse auf eine Änderung im Kraftstoffverbrauch hinweisen.
3. Bei den Fahrten ohne Assistenzsystem am Ende des untersuchten Zeitraums sind Änderungen gegenüber den Fahrten ohne Assistenzsystem am Anfang des untersuchten Zeitraums nachweisbar.
4. Die Ergebnisse aus der ersten Fahrt mit Assistenz im Vergleich zur Baseline sind vergleichbar zu den Ergebnissen aus der vorherigen Studie im großen Fahrsimulationsaufbau in Kapitel 4.

## 5.4 Methodik

Die Studie wurde in den Räumen des Lehrstuhls für Ergonomie über einen Zeitraum von drei Wochen durchgeführt. Jeder Proband fuhr in diesem Zeitraum zwölfmal mit dem Assistenzsystem. Technisch vorbereitet und teilweise als Versuchsleiter mitbetreut wurde der Versuchsaufbau im Rahmen der Studienarbeiten von Wieland, 2013, Wu, 2013 und Sippl, 2014. Die folgenden Abschnitte beschreiben detailliert den Versuchsaufbau.

### **5.4.1 Versuchsumgebung, Probandenkollektiv und Assistenzsystem**

Für die Untersuchungen wurden zwei identische Fahrsimulatoren zur parallelen Nutzung verwendet. Sie bestehen jeweils aus einem Rechner und einem Bildschirm mit 24 Zoll Bilddiagonale und einer Auflösung von 1920 \* 1080 Pixel. Gefahren wurde mit dem *G27 Racing Wheel* von Logitech bestehend aus einem aktiven Lenkrad und der zugehörigen Pedalerie. Es wurde eine einfache Lenkradsimulation zur aktiven Rückmeldung genutzt. Zusätzlich wurde ein kleines aktives Lautsprechersystem angeschlossen. Die Konfigurationen beider PC-Systeme wurden angeglichen, so dass es keinen Unterschied zwischen den Systemen mehr gibt. Aufgebaut wurden die Systeme in einem einfachen Laborraum am Lehrstuhl für Ergonomie, wo auch

die Versuche stattfanden. Als Simulationssoftware wurde die vom Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften entwickelte Software SILAB mit der Fahrdynamik von Müller Systemtechnik eingesetzt. Die Fahrdynamikdaten der Simulation wurden in der Simulationsfrequenz von 60 Hz aufgezeichnet. Die Hardware des Systems ist somit sehr einfach. Nach den Qualitätskriterien von Carsten & Jamson (2011) entspricht der Aufbau ohne (Teil-) Mockup und nur einem einzigen Monitor nur einfachsten Anforderungen. Die Simulation Silab mit der sehr realistischen Szenengestaltung, der realitätsnahen Fahrzeugdynamik und den Fremdverkehrsmodellen entsprechen dagegen einem sehr hohen Standard, welcher auch in sehr großen Fahrsimulatoren üblich ist. Insgesamt ist der Aufbau einerseits sehr einfach, bietet aber trotzdem sehr komplexe Szenarien (Abbildung 5-8). Wichtig ist, dass durch die Fahrzeugdynamiksimulation, den sehr realistischen Szenarien und der ausreichenden Bildauflösung der Simulator im Bereich der Längsführung auf einem hohen Standard ist.





*Abbildung 5-8: Versuchsaufbau zur Langzeitstudie*

Das Assistenzsystem zum vorausschauenden Fahren wird mit Hilfe einer in die Fahrsimulation integrierten Head-Up-Display (HUD) Anzeige dargestellt. Diese Lösung wurde schon einmal in einer sehr ähnlichen Variante untersucht und validiert (Rommerskirchen & Bengler, 2012) und baut auf dem System aus Kapitel 4.3.2 auf. Dabei werden die kommenden Verkehrszeichen animiert. Zusätzlich wird als Handlungsaufforderung noch ein Symbol zum wegnehmen des Fußes vom Gaspedal gezeigt. Außerhalb der Verzögerungssituationen beschränkt sich die HUD-Anzeige auf die Anzeige der aktuellen gefahrenen Geschwindigkeit und der erlaubten Höchstgeschwindigkeit und eventueller vorhandenen Navigationshinweisen. Außerdem werden akustische Navigationsansagen gegeben. In den Fahrten ohne Unterstützung durch das As-

sistenzsystem wird nur die aktuell gefahrene Geschwindigkeit angezeigt und akustische Navigationsansagen wiedergegeben. Implementiert wurde die Anzeige im Rahmen der Studienarbeit von Wu (2013); (siehe auch Abbildung 5-9)



Abbildung 5-9: HMI des vorausschauenden Fahrerassistenzsystems im HUD (in der Abbildung, Anzeige nicht übereinstimmend mit der Verkehrssituation; aus Wu, 2013)

Zehn Probanden nahmen an der kompletten Versuchsreihe teil. Die Probanden wurden aus dem studentischen Umfeld des Lehrstuhls für Ergonomie rekrutiert. Für eine erfolgreiche Teilnahme der Versuchsreihe bekamen die Probanden eine Entlohnung von insgesamt 100 € pro Person. Drei Probanden waren weiblich. Der jüngste Teilnehmer war 20, der Älteste 26 mit einem mittleren Alter aller Teilnehmer von 22,4 Jahren. Die Fahrerfahrung war generell eher gering. Sieben von zehn Probanden fahren weniger als 5000 km im Jahr. Sechs Probanden hatten schon Erfahrung mit Fahrsimulatoren und sind schon mal in einem Fahrsimulator gefahren.

#### 5.4.2 Streckenaufbau und Situationen

Da das Ziel des Versuches darin liegt, die Änderung des Verhaltens aufgrund des Assistenzsystems zu untersuchen, muss bei der Streckengestaltung darauf Rücksicht genommen werden. Es sollte sichergestellt werden, dass die Ergebnisse nicht durch das Erlernen einer spezifischen Versuchsstrecke verfälscht werden. Darum wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit (Sippl, 2014) elf verschiedene Versuchsstrecken erstellt. Die Fahrtauern zum Durchfahren der Versuchsstrecken liegen bei ca. 15 bis 25 min.

Um trotzdem eine Änderung des Fahrerverhaltens über die Zeit dokumentieren zu können wurden in alle Simulationsstrecken zwei immer gleiche Situationen zufällig eingefügt, die dann ausgewertet wurden. Bei den zwei Situationen handelte es sich um eine Situation auf der

Landstraße bei der wegen einer Geschwindigkeitsbegrenzung das Tempo von 100 km/h auf 70 km/h reduziert werden muss und um eine Stadtsituation bei der der Fahrer aufgrund einer roten Ampel anhalten muss. Außer den beiden gerade beschriebenen Situationen waren in jeder Versuchsstrecke noch zahlreiche weitere Anzeigesituationen vorhanden, welche aber nicht weiter ausgewertet werden. Die Reihenfolge, in der die Strecken durchfahren wurde, war für jeden Probanden gleich.

Die erste Simulationsstrecke wurde, um eine absolute Vergleichbarkeit zwischen Anfang und Ende des Versuchszeitraums zu bekommen, sowohl am Anfang des Versuchszeitraumes als auch am Ende des Versuchszeitraumes durchgefahren. Dabei wurde die erste Strecke jedes Mal einmal mit und einmal ohne Assistenzsystem durchgefahren. Die Reihenfolge ob mit oder ohne Assistenzsystem zuerst gefahren wird, wurde zwischen den Probanden permutiert. Es wird dabei davon ausgegangen, dass sich die Probanden nach drei Wochen nicht mehr an die erste Strecke erinnern und es deswegen kein Lerneffekt aufgrund der Streckenkenntnis gibt.

### **5.4.3 Fragebögen**

Als Fragebögen wurden ein demografischer Fragebogen zum Beginn des Versuches eingesetzt und der Akzeptanzfragebogen von Laan et al. (1997) in der deutschen Übersetzung von Kondzior (2016) (Anhang C). Der Vorteil an diesem Fragebogen ist, dass er speziell für Fahrerakzeptanz entwickelt worden ist und mit neun Items, fünf für die wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit (*Usefulness*) und vier Items für die Zufriedenheit (*Satisfying*), relativ kurz ist. Nach jeder zweiten Fahrt wurde die Akzeptanz abgefragt. Die Fragebögen wurden vom Probanden direkt nach der Versuchsfahrt am gleichen Rechner ausgefüllt.

### **5.4.4 Versuchsdurchführung**

Der Versuch wurde mit allen Probanden im gleichen dreiwöchigen Zeitraum durchgeführt. Die dreiwöchige Versuchsdauer basiert auf den Erkenntnissen zu den ACC Versuchen aus Kapitel 5.1.3, dass sich nach drei Wochen keine Änderung mehr nachweisen lässt. Die Probanden mussten 14 Fahrten absolvieren, davon zwölf mit Assistenzsystem und zwei ohne Assistenzsystem. Sie bekamen am ersten Tag eine schriftliche Beschreibung zur Durchführung und den Zielen des Versuches. Daran angeschlossen war die Einverständniserklärung zur Teilnahme an dem Versuch und zur Datenaufzeichnung. Als Versuchsziel wurde den Probanden mitgeteilt, dass das langfristige Verhalten mit einem vorausschauenden Fahrerassistenzsystem zur Kraftstoffeinsparung untersucht werden soll. Die Probanden wurden darauf hingewiesen

die Straßenverkehrsordnung einzuhalten, ihren normalen Fahrstil beizubehalten und sie wurden daran erinnert, dass alle Fahrten aufgezeichnet und ausgewertet werden. Danach bekamen Sie eine Einführung in die Fahrsimulation und durften eine Übungsfahrt machen, so lange bis sie mit der Bedienung und der Fahrweise in der Fahrsimulation vertraut waren. Die Probanden wurden danach mit der Bedienung des Systems vertraut gemacht, so dass sie in der Lage waren die Versuchsstrecken selber zu starten und die Fragebögen eigenständig auszufüllen. Außerdem wurden die Probanden darauf hingewiesen sich während des dreiwöchigen Zeitraums nicht über die Versuche auszutauschen. Erst danach starteten die Versuche mit der Fahrt auf der ersten Versuchsstrecke mit und ohne Assistenzsystem. Die Fahrten mit und ohne Assistenzsystem auf der ersten Versuchsstrecke wurden zwischen den Versuchsteilnehmern permutiert.

Die weiteren zwölf Fahrten wurden in der Folgezeit ohne direkte Überwachung von den Probanden durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Probanden auf vier Versuchstage pro Woche kamen, so dass der Versuch sich über einen Zeitraum von drei Wochen erstreckte. Die Zeiteinteilung wurde aber den Probanden innerhalb der Öffnungszeiten des Lehrstuhls freigestellt. Sie durften allerdings nur eine Versuchsfahrt pro Tag und genau vier Versuchsfahrten pro Woche absolvieren. Zur Überwachung mussten die Probanden mit Ihrer anonymisierten Probandennummer ein Protokoll ausfüllen, wann sie welche Versuchsstrecke gefahren sind, so dass am Ende die Versuchsdaten den Probandennummern zugeordnet werden können. Die Fragebögen wurden elektronisch auf dem Versuchscomputer ausgefüllt und gespeichert. Bei Fragen und Problemen konnten die Probanden jederzeit einen Lehrstuhlanghörigen kontaktieren. Bis auf einen einmaligen notwendigen Neustart vor der Versuchsfahrt zur Rekalibrierung des Lenkrades kam es zu keinen technischen oder organisatorischen Problemen und Anfragen von Seiten der Probanden. Am letzten Tag der Versuchsreihe befuhren die Probanden wieder die Strecke vom ersten Tag mit und ohne Assistenz. Auch hier wurde zwischen den Versuchsteilnehmern die Reihenfolge permutiert. Abbildung 5-10 zeigt den Ablauf des Versuches.

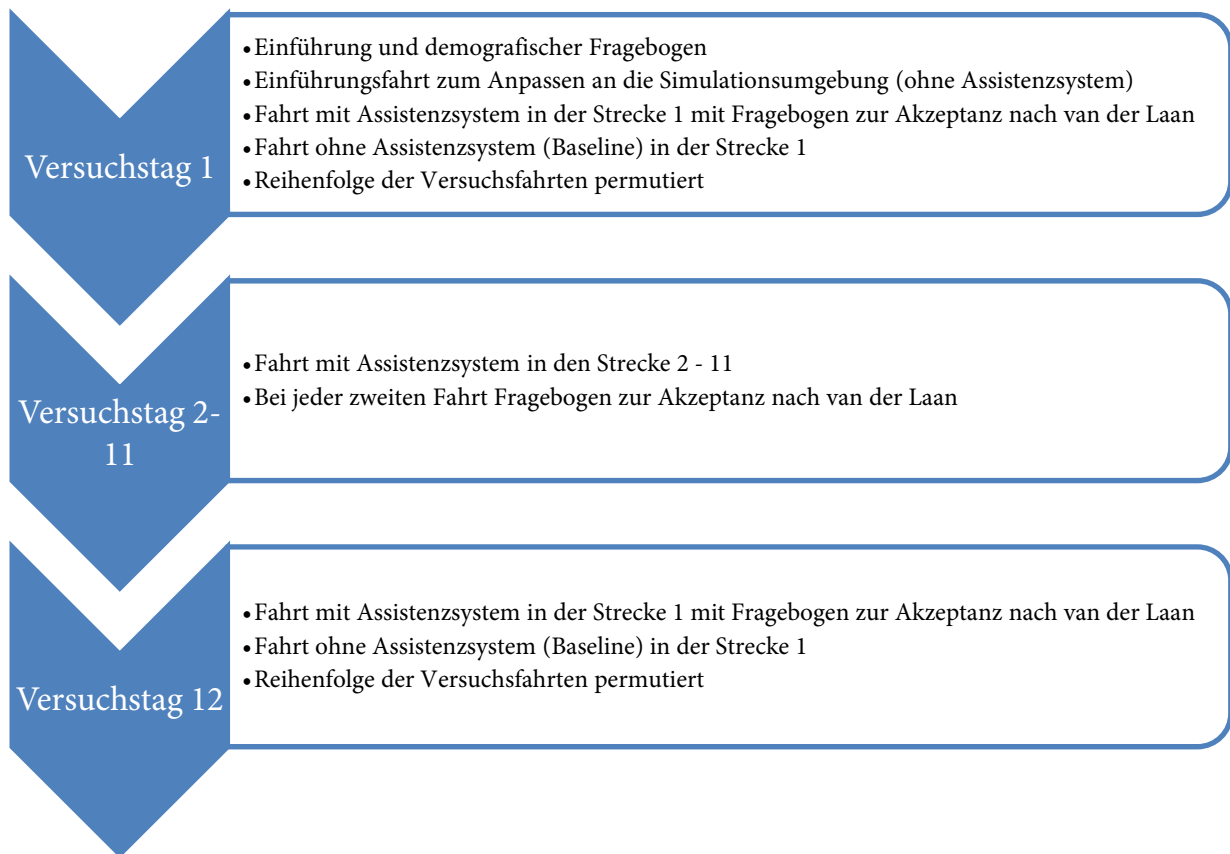


Abbildung 5-10: Ablauf der Versuchsdurchführung

## 5.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Fragebögen und aus den Fahrsimulator-daten dargestellt. Es wird dabei bei allen statistischen Testverfahren immer von einem Signifi-kanzniveau von  $\alpha = 5\%$  ausgegangen.

### 5.5.1 Ergebnisse der Akzeptanzuntersuchung

Zur Untersuchung der Akzeptanz wurden die Werte des Fragebogens nach Laan et al., 1997 ausgewertet. Dazu werden die Werte für die wahrgenommene Usefulness und Satisfying ausgewertet. Es wurden nur nach jeder zweiten Fahrt Daten erhoben, so dass es für sieben Fahr-ten Werte gibt. Die Skala bewegt sich dabei zwischen -2 und 2. Sowohl für die Usefulness als auch für die Satisfying Skala werden im Mittel von allen Probanden bei jeder Fahrt Werte zwi-schen 1 und 1,5 vergeben. Über alle Fahrten ergibt dies für die Usefulness-Skala einen mittleren Wert von 1,32 (Standardabweichung: 0,46) und für die Satisfying-Skala einen mittleren Wert von 1,28 (Standardabweichung: 0,53). Dies bedeutet eine durchgängig sehr hohe Akzeptanz.

Abbildung 5-11 zeigt die Entwicklung der Akzeptanz über die Versuchsfahrten für die Usefulness und Satisfying-Werte.

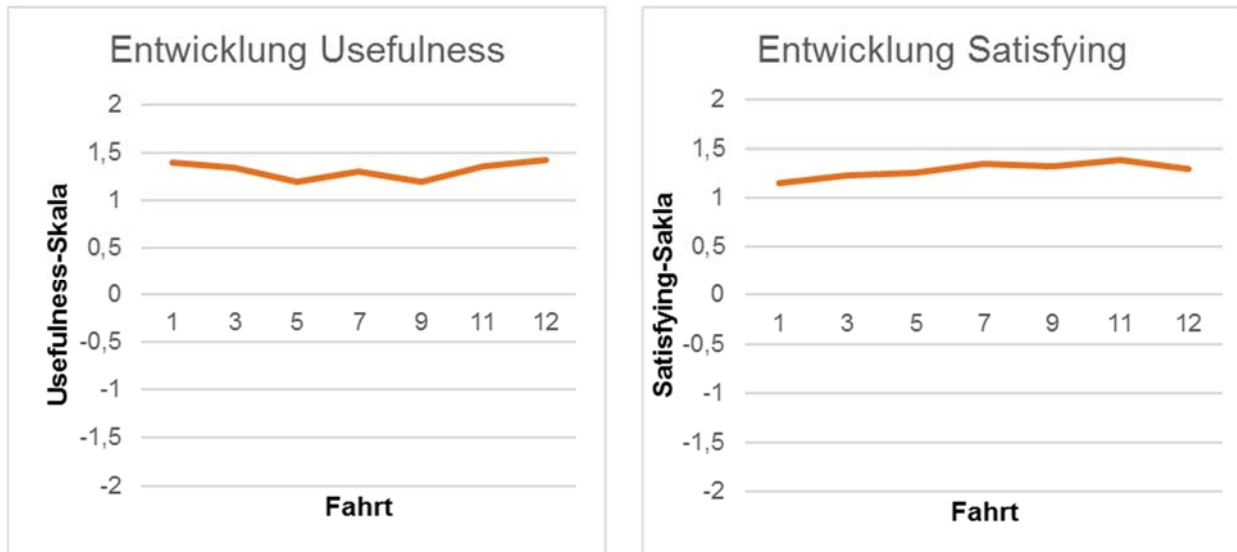


Abbildung 5-11: Entwicklung der Usefulness- und Satisfying-Werte über die Versuchsfahrten aus dem van der Laan Akzeptanzfragebogen

Die eigentliche Frage ist, ob sich im Verlauf der Langzeitmessung eine Änderung der Akzeptanz ergibt. Dazu wurde zuerst geprüft, ob einzelne Fahrten sich signifikant von anderen Fahrten unterscheiden. Die ANOVAs mit Messwiederholung für die jeweiligen Werte aus der Usefulness-Skala und der Satisfying-Skala zeigten unter Anwendung der Greenhouse-Geisser Korrektur keine signifikanten Unterschiede (Usefulness:  $F(1,7; 13,6) = 0,509$ ,  $p = .583$ ; Satisfying:  $F(2,3; 18,5) = 0,916$ ,  $p = .430$ ). Dies bedeutet, dass keine signifikanten Änderungen zu einem beliebigen Zeitpunkt in der Usefulness-, als auch in der Satisfying-Skala erkennbar sind.

### 5.5.2 Ergebnisse des Fahrverhaltens

Die Daten zum Fahrverhalten beinhalten alle durch die Fahrsimulation erhobenen Daten. Dies sind vor allem Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte, sowie auch Pedalstellungen. Verbrauchsdaten konnten nicht erhoben werden, da es in dem verwendeten Setup keine Möglichkeit gab die komplexen Verbrauchssimulationen während der Simulation zusätzlich durchzuführen. Dies ist aber auch nicht notwendig, da die erzielbaren Verbrauchseinsparungen schon in anderen Studien (vgl. zum Beispiel Ergebnisse aus Kapitel 4) nachgewiesen werden konnten. Ziel dieses Versuches lag daher auch in der Betrachtung des Fahrverhaltens und dessen Änderungen. Dazu werden, wie in Kapitel 4.4.2 bei der Untersuchung des Komplexitätseinflusses, die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsverläufe betrachtet. Zusätzlich

werden, die bei der Komplexitätsstudie in Tabelle 4-3 als wichtigste Einflussparameter erkannten fahrdynamischen Parameter, genauer betrachtet. Dies sind die mittlere Gaspedalstellung, die Dauer der Gaspedalbetätigung, die Reaktionszeit auf die Anzeige und die mittlere Geschwindigkeit.

Die Analyse der Fahrdaten teilt sich in drei Betrachtungsziele auf. Als erstes werden die Daten einem Vergleich zu den Versuchen aus Kapitel 4 unterzogen. Hier werden noch einmal Baseline und Fahrt mit Assistenzsystem verglichen. Als weiteres werden die Änderungen im Verlauf der Nutzung des Assistenzsystems untersucht. Zum Schluss wird außerdem noch ein Vergleich zwischen der ersten und der letzten Baselinefahrt gezogen.

Da die Fahrdaten durchgängig nicht normalverteilt sind, wurden die statistischen Signifikanzanalysen mit nichtparametrischen Testmethoden durchgeführt. Anstelle des t-Tests wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test angewendet und anstelle der einfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung die Friedman-ANOVA oder Friedman-Test.

#### 5.5.2.1 Vergleich der ersten Baseline mit der ersten assistierten Fahrt

Im Folgenden werden die Daten der Baselinefahrt mit der ersten assistierten Fahrt verglichen. Die Baselinefahrt und die assistierte Fahrt wurden auf der gleichen Strecke nacheinander durchgeführt. Dabei wurde zwischen den Probanden die Fahrtrihenfolge permutiert. Es soll gezeigt werden, dass auch in einem kleineren Simulationsaufbau ähnliche Ergebnisse, wie in Versuchen mit einem großen Fahrsimulator, wie er in Kapitel 4 eingesetzt wurde, erzielt werden können. Damit soll die 4. Hypothese, die Validität dieses Versuchsaufbaus im Vergleich zu den bisherigen Untersuchungen in einem komplexeren und größeren Fahrsimulatorenaufbau, belegt werden.

Die erste Strecke beinhaltete 13 Situationen, in denen das HMI den Probanden eine antizipative Verzögerung empfahl. Dies waren Situationen mit Verkehrszeichen, Lichtsignalanlagen und Abbiegevorgängen auf Landstraßen und in der Stadt ähnlich denen welche in Kapitel 4.3.3 beschrieben wurden. Es wurden alle Situationen miteinander verglichen. Es werden dabei folgende Variablen betrachtet: Mittlere Gaspedalstellung, Dauer der Gaspedalbetätigung, der Reaktionszeitpunkt und die mittlere Geschwindigkeit. Diese Variablen wurden ausgewählt, da diese am meisten durch eine Fahrt mit dem Assistenzsystem verändert werden. Dies hatten vorherige Studien gezeigt (siehe auch Kapitel 4.4.2).

In jeweils 8 von den 13 (61,5 %) untersuchten Situationen ist die Dauer der Gaspedalbetätigung signifikant kürzer, der Reaktionszeitpunkt ist signifikant früher und die mittlere Ge-

schwindigkeit ist signifikant geringer beim Vergleich zwischen Baselinefahrt und Fahrt mit Assistenz (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test mit einseitiger Signifikanz). In sechs (46,2 %) Situationen ist die mittlere Gaspedalstellung signifikant geringer. Dies sind verhältnismäßig etwas weniger Situationen im Vergleich zu Tabelle 4-3, in denen sich die genannten Variablen signifikant verändern. Dies liegt vor allem an der geringeren Stichprobengröße von nur 10 Probanden für den jeweiligen Signifikanztest im Vergleich zu der deutlich größeren Anzahl von 27 Probanden im Versuch in Tabelle 4-3. Insgesamt verbessern sich die Werte, unter dem Gesichtspunkt, dass diese auch auf einen geringeren Kraftstoffverbrauch hinweisen, tendenziell in nahezu allen Situationen bei der Fahrt mit Assistenz wenn auch nicht überall signifikant. Deutlich wird dies auch an einer Betrachtung des mittleren Geschwindigkeitsverlaufs mit und ohne Assistenzsystem. Abbildung 5-12 zeigt beispielsweise den Verlauf der über alle Probanden gemittelten Geschwindigkeiten auf der Landstraße. Hier sind trotz der Unterschiede in der Geschwindigkeit zum Beginn der Situation, der frühere Ausrollzeitpunkt mit Unterstützung durch das Assistenzsystem ungefähr 250 m vor dem Verkehrszeichen erkennbar.

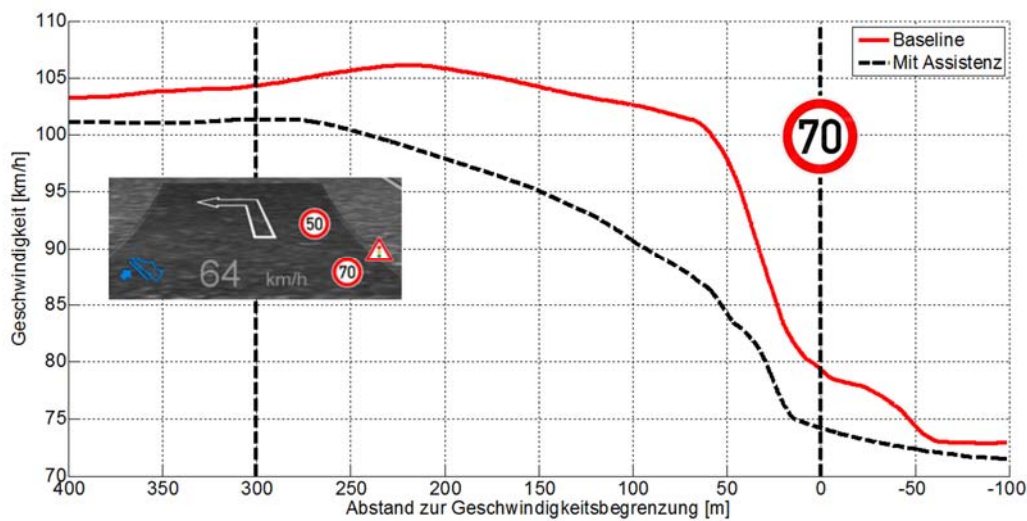


Abbildung 5-12: Geschwindigkeitsverlauf (mittlere Geschwindigkeit aller Fahrer) der Fahrten mit und ohne Assistenz in der Verkehrssituation des Zufahrens auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf der Landstraße

### 5.5.2.2 Vergleich aller assistierten Fahrten

Der Vergleich aller assistierten Fahrten dient zur Untersuchung der Hypothese aus Kapitel 5.3, ob sich Änderungen im Fahrverhalten ergeben. Die Nullhypothese ist, dass sich keine Änderung im Fahrverhalten nachweisen lässt.



Entsprechend wurde untersucht, ob einzelne Fahrten sich signifikant von den restlichen unterscheiden. Der Vergleich aller assistierten Fahrten wurde aufgrund der nicht-normalverteilten Daten mit Hilfe eines nichtparametrischen Verfahrens, dem Friedman-Test, durchgeführt. Wie schon anfangs in 5.5.2 erwähnt, wurden folgende Variablen untersucht: die mittlere Gaspedalstellung über die gesamte Situation, die Dauer der Gaspedalbetätigung, die Reaktionszeit auf die Anzeige und die mittlere Geschwindigkeit. Mit Hilfe des Friedman-Tests soll festgestellt werden, ob und bei welchen Fahrten sich die Werte signifikant von den anderen Fahrten unterscheiden.

Tabelle 5-1 gibt die Ergebnisse der Situation auf der Landstraße beim Zufahren auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung wieder. Die Analysen zeigen keinen signifikanten Einfluss des Zeitpunktes der Fahrt auf das Fahrverhalten mit Assistenz und dementsprechend auch keine sichtbare Entwicklung im Fahrverhalten.

*Tabelle 5-1: Analyse der Fahrverhaltensvariablen auf der Landstraße beim Zufahren auf eine Geschwindigkeitsbegrenzung*

Abhängige Variable	Friedman-Test	Signifikant?
Mittlere Gaspedalstellung	$\chi^2(11) = 12,78; p = 0,308$	Nein
Dauer der Gaspedalbetätigung	$\chi^2(11) = 15,60; p = 0,157$	Nein
Reaktionszeit auf die Anzeige	$\chi^2(11) = 10,88; p = 0,453$	Nein
Mittlere Geschwindigkeit	$\chi^2(11) = 8,75; p = 0,645$	Nein

Der Friedman-Test kann nur zeigen, ob es über alle Probanden zusammengenommen zu einer Verhaltensveränderung kommt. Tatsächlich ist es möglich, dass einige Probanden eine positive Tendenz, andere eine negative Tendenz in ihrem Fahrverhalten aufweisen, welche sich über das gesamte Kollektiv ausgleichen könnte. Darum werden auch noch zusätzlich alle Probanden einzeln betrachtet. Dazu werden lineare Regressionen über die vier Variablen separat für jeden Probanden einzeln durchgeführt.

Von den 40 Regressionen, die durchgeführt wurden, besitzen nur 10 ein signifikantes Beta (standardisierter Regressionskoeffizient). Die signifikanten Betas verteilen sich in sieben von den signifikanten zehn Fällen auf die Versuchspersonen 8 und 9. Während Versuchsperson 8 eine Tendenz, basierend auf den Analysen der linearen Regression, zu längeren Gaspedalbetätigungen, höheren mittleren Geschwindigkeiten, längeren Reaktionszeiten und höheren mittleren Gaspedalstellungen zeigt, zeigt Versuchsperson 9 das genau entgegengesetzte Verhalten. Allerdings liegt das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bei beiden Probanden für alle Variablen unter 0,5.

Tabelle 5-2 und Abbildung 5-13 zeigen speziell die Ergebnisse der linearen Regression der beiden genannten Versuchspersonen. Bei den anderen acht Versuchspersonen ist keine lineare Tendenz zu erkennen ihr Verhalten über die Fahrten zu ändern.

*Tabelle 5-2: Ergebnisse der linearen Regression über die Fahrten (x) der Versuchspersonen 8 und 9*

Abhängige Variable (y)	VP 8	VP 9
Mittlere Gaspedalstellung (-)	$F(1,10) = 5,75; p = 0,037; R^2 = 0,365$ $y = 0,003x + 0,012$	$F(1,10) = 7,17; p = 0,023; R^2 = 0,418$ $y = -0,006x + 0,077$
Dauer der Gaspedalbetätigung (s)	$F(1,10) = 8,35; p = 0,016; R^2 = 0,455$ $y = 0,040x + 0,014$	$F(1,10) = 8,08; p = 0,017; R^2 = 0,447$ $y = -0,215x + 0,076$
Reaktionszeit auf die Anzeige (s)	$F(1,10) = 8,23; p = 0,017; R^2 = 0,451$ $y = 0,039x + 0,695$	$F(1,10) = 8,14; p = 0,017; R^2 = 0,449$ $y = -0,216x + 2,812$
Mittlere Geschwindigkeit (km/h)	$F(1,10) = 5,11; p = 0,047; R^2 = 0,338$ $y = 0,648x + 91,831$	$F(1,10) = 4,17; p = 0,068; R^2 = 0,294$ $y = -0,439x + 99,155$

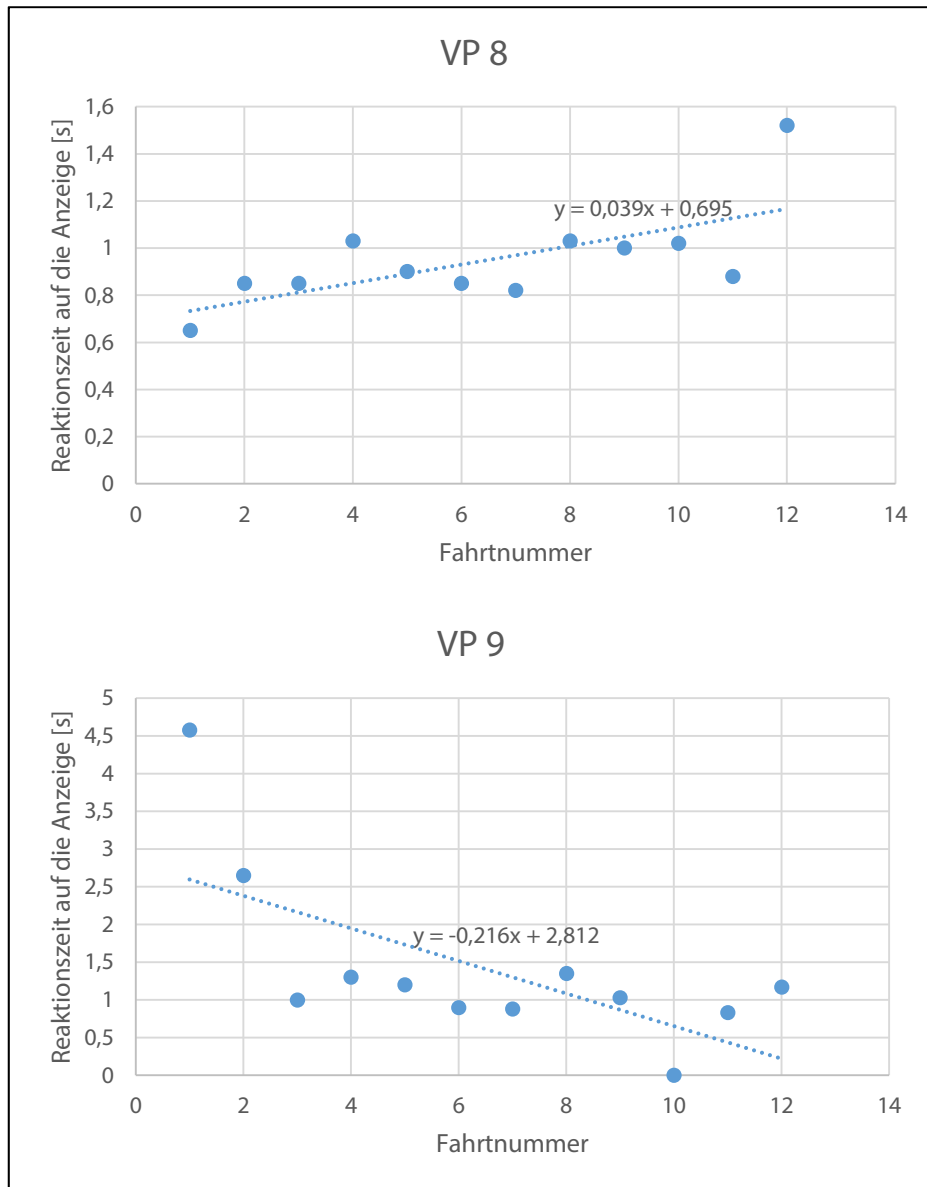


Abbildung 5-13: Entwicklung der Reaktionszeit auf die Anzeige über die Fahrten von Versuchsperson 8 und 9 und zugehörige Regressionsgerade

Zusammenfassend bedeutet dies, dass nach Betrachtung über alle Probanden mit Hilfe des Friedman-Tests keine einzelne Fahrt speziell hervorsteicht. Selbst die erste Fahrt unterscheidet sich nicht signifikant zu den anderen. Genauso wenig sind keine Tendenzen bei den meisten Probanden zur Änderung des Fahrverhaltens zu beobachten.

### 5.5.2.3 Vergleich der Fahrten ohne Assistenzsystem

Die Fahrten ohne Assistenzsystem werden für die Untersuchung der Hypothese aus Kapitel 5.3 betrachtet. Es wird analysiert, ob zwischen der Fahrt ohne Assistenzsystem am ersten Versuchstag und der Fahrt ohne Assistenzsystem signifikante Unterschiede zu beobachten sind.

Dazu wird aufgrund der fehlenden Normalverteilung der Daten anstelle des T-Tests der zweiseitige Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test genutzt. Da die Versuchsstrecken am ersten und am letzten Versuchstag absolut identisch waren, können alle Situationen miteinander verglichen werden. Dies bedeutet, dass insgesamt 13 verschiedene Versuchssituationen zur Verfügung stehen. Es werden, wie auch in den vorherigen Kapiteln, die mittlere Gaspedalstellung, die Dauer der Gaspedalbetätigung, die Reaktionszeit auf die Anzeige und die mittlere Geschwindigkeit auf Signifikanz getestet.

Tabelle 5-3 fasst die Ergebnisse der zweiseitigen Signifikanztests für alle 13 Situationen mit den vier untersuchten Variablen zusammen. In nur 8 von 52 Fällen sind signifikante Änderungen zwischen dem ersten und letzten Versuchstag bei der Fahrt ohne Assistenz beobachtbar. Dabei wird in 7 Fällen eine signifikante Verbesserung des Verhaltens zu Gunsten der Fahrt am letzten Versuchstag zu sichtbar.

*Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs der Baselinefahrten am ersten Versuchstag mit den Baselinefahrten des letzten Versuchstages mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für die untersuchten Variablen*

Abhängige Variable	Signifikant?
Mittlere Gaspedalstellung	In 3 von 13 Situationen signifikant geringere mittlere Gaspedalstellung in der Abschlussfahrt
Dauer der Gaspedalbetätigung	In 2 von 13 Situationen signifikant kürzere Dauer der Gaspedalbenutzung in der Abschlussfahrt
Reaktionszeit auf den fiktiven Anzeigebeginn	In 2 von 13 Situationen signifikant frühere Reaktion in der Abschlussfahrt
Mittlere Geschwindigkeit	In 1 von 13 Situationen signifikant höhere mittlere Geschwindigkeit in der Abschlussfahrt

#### 5.5.2.4 Vergleich Baselinefahrt und Assistenzfahrt am letzten Versuchstag

Zusätzlich zum Vergleich, ob sich das Verhalten in den Baselinefahrten am Anfang und am Ende des Versuchssystems unterscheidet, soll auch noch einmal überprüft werden, ob sich das Fahrverhalten mit und ohne Assistenzsystem am Ende des Versuchszeitraums signifikant unterscheidet. Dazu werden alle 13 zu antizipierenden Situationen der Baselinefahrt mit der Assistenzfahrt am letzten Versuchstag verglichen. Die Signifikanzuntersuchungen erfolgen analog zu denen aus Kapitel 5.5.2.1.

Tabelle 5-4 fasst die statistische Auswertung des Vergleichs der Baselinefahrten mit den Fahrten mit Assistenzsystem am letzten Versuchstag mit dem einseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests zusammen. Es wird deutlich, dass es auch noch am letzten Versuchstag zu signifikanten Verbesserungen bei der Fahrt mit Assistenzsystem im Vergleich ohne Assistenzsystem kommt. Allerdings ist die Anzahl der Situationen in denen es zu signifikanten Verbesserungen kommt, geringer als beim Vergleich mit und ohne Assistenzsystem am ersten Versuchstag, wie in Kapitel 5.5.2.1 beschrieben. Mit Ausnahme der mittleren Gaspedalstellung, wo es weiterhin in sechs Situationen zu einer signifikanten Verbesserung mit dem Assistenzsystem kommt, sind es bei der Dauer der Gaspedalbetätigung, der Reaktionszeit und bei der mittleren Geschwindigkeit deutlich weniger Situationen. Hier gab es am ersten Versuchstag noch in jeweils acht Fällen Verbesserungen durch das Assistenzsystem, während am letzten Versuchstag nur noch zwischen einmal und sechsmal signifikante Verbesserungen nachweisbar sind.

*Tabelle 5-4: Zusammenfassung der Ergebnisse des Vergleichs der Baselinefahrten mit den Fahrten mit Assistenzsystem am letzten Versuchstag mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für die untersuchten Variablen*

Abhängige Variable	Signifikant?
Mittlere Gaspedalstellung	In 6 von 13 Situationen signifikant geringere mittlere Gaspedalstellung in der Fahrt mit Assistenzsystem
Dauer der Gaspedalbetätigung	In 5 von 13 Situationen signifikant kürzere Dauer der Gaspedalbenutzung in der Fahrt mit Assistenzsystem
Reaktionszeit auf den fiktiven Anzeigebeginn	In 6 von 13 Situationen signifikant frühere Reaktion in der Fahrt mit Assistenzsystem
Mittlere Geschwindigkeit	In 1 von 13 Situationen signifikant geringere mittlere Geschwindigkeit in der Fahrt mit Assistenzsystem

#### 5.5.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse des Fahrverhaltens

Die Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln zeigen, dass es zwischen den einzelnen Fahrten mit Assistenz keine signifikanten Änderungen gibt. In der Baseline aber wird sowohl am Anfang als auch am Ende schlechter gefahren. Die folgenden Abbildung 5-14 für die Reaktionszeiten und Abbildung 5-15 für die mittleren Geschwindigkeiten zeigen dies über alle Fahrten noch einmal deutlich. Die auffällige Abweichung des Mittelwerts und des Konfidenzintervalls in Fahrt 10, basiert auf dem extrem stark abweichenden Verhalten einer Versuchsperson für genau dieser Fahrt. Diese Versuchsperson hatte in dieser Situation überhaupt nicht auf die Anzeige reagiert.

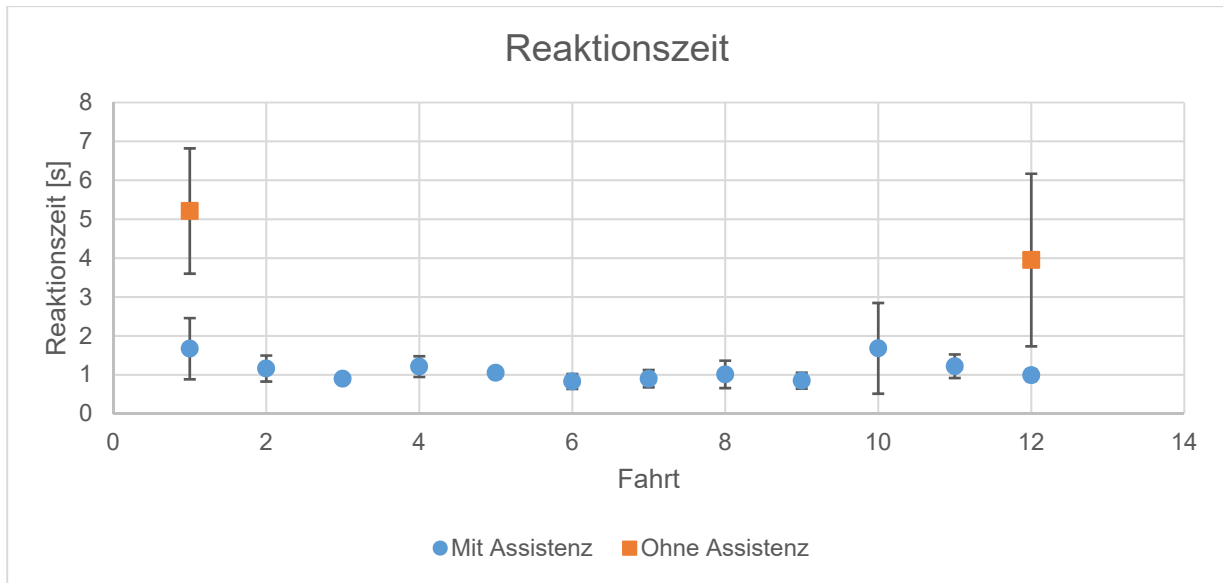


Abbildung 5-14: Mittlere Reaktionszeiten auf der Landstraße über alle Fahrten mit und ohne Assistenzsystem. Fehlerbalken zeigen Konfidenzintervalle an.

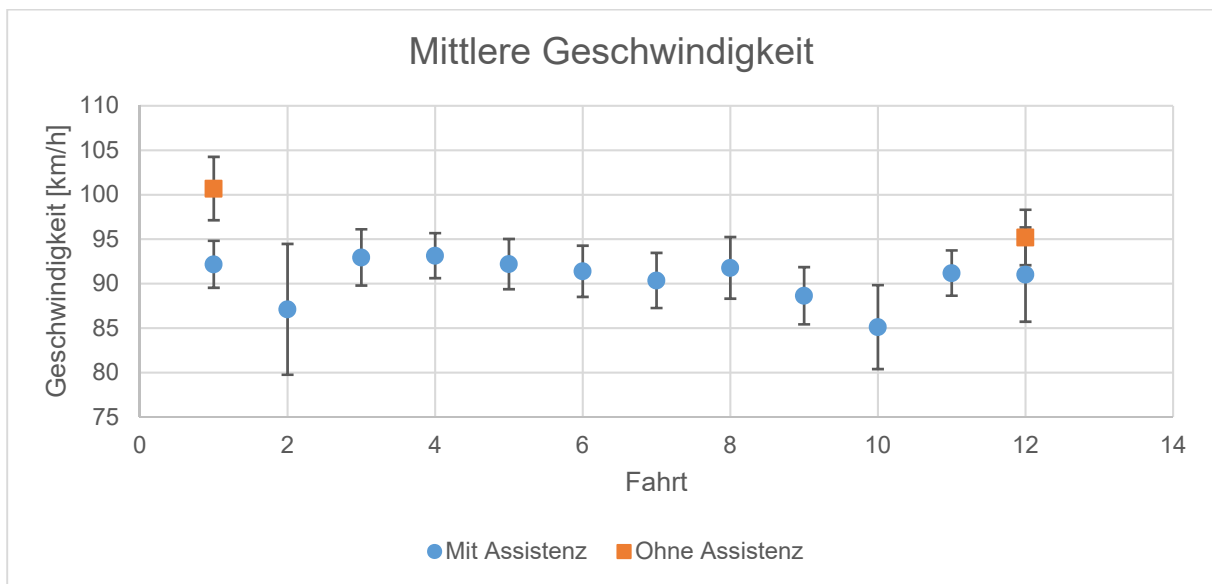


Abbildung 5-15: Mittlere Geschwindigkeit auf der Landstraße über alle Fahrten mit und ohne Assistenzsystem. Fehlerbalken zeigen Konfidenzintervalle für ein Konfidenzniveau von 95 % an.

Auch die in Abbildung 5-16 abgebildeten über alle Probanden gemittelten Geschwindigkeitsverläufe verdeutlichen noch einmal, dass das Fahrverhalten mit Assistenz unabhängig von dem Zeitpunkt sehr einheitlich ist. Sehr wichtig ist, was auch in Abbildung 5-16 gut zu sehen ist, dass die Startgeschwindigkeiten mit denen die Probanden in die Situation einfahren, über alle Fahrten sehr ähnlich sind. Auch der Unterschied zu den Baselinefahrten wird deutlich. Obwohl die Anfangsbedingungen gleich sind wird bei den Baselinefahrten später auf die Situ-

ation reagiert. In den Graphen für die Fahrten ohne Assistenz ist sogar der ungefähre Bremszeitpunkt ca. 50 – 100 m vor der Geschwindigkeitsbegrenzung erkennbar. Die Fahrt ohne Assistenzsystem zum Ende des Untersuchungszeitraums ist erkennbar besser als die zum Anfang des Untersuchungszeitraums.

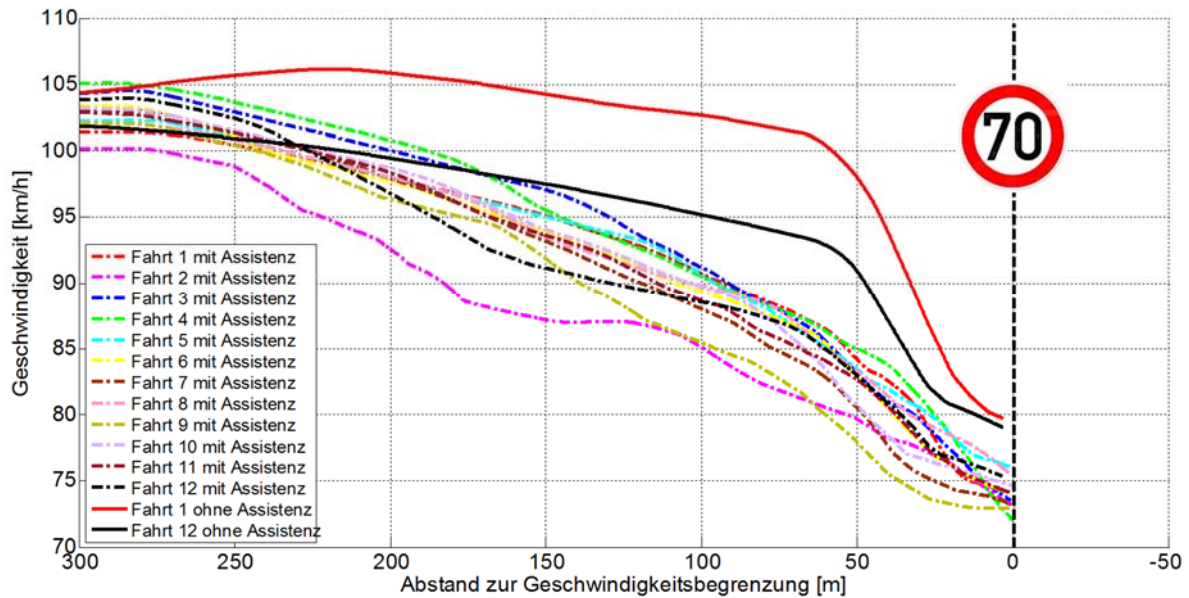


Abbildung 5-16: Mittlere Geschwindigkeitsverläufe für alle Fahrten auf der Landstraße (durchgezogene Linien Fahrten ohne Assistenz, gestrichelte Fahrten mit Assistenz)

Zusammenfassend zeigen die Fahrdaten folgendes Bild:

- Die Fahrten ohne Assistenzsystem sind häufig signifikant schlechter (spätere Verzögerung, höhere mittlere Geschwindigkeit etc.) als mit Assistenzsystem
- Über den gesamten Versuchszeitraum können keine eindeutigen signifikanten Änderungen im Fahrverhalten mit dem Assistenzsystem festgestellt werden und somit auch keine Entwicklungstendenzen des Fahrverhaltens über den Versuchszeitraum
- Die Fahrten ohne Assistenzsystem am Ende des Versuchszeitraums sind signifikant schlechter als mit Assistenzsystem. Es sind aber Tendenzen erkennbar, dass die Fahrten ohne Assistenzsystem am Ende des Versuchszeitraums etwas besser sind als die Fahrten ohne Assistenzsystem am Anfang des Versuchszeitraums.

## 5.6 Diskussion der Ergebnisse der Langzeitstudie

Im Folgenden wird auf die in Kapitel 5.3 aufgestellten Fragestellungen und Hypothesen dieser Studie eingegangen.

### 5.6.1 Akzeptanzänderung

Die erste Forschungsfrage ist, wie sich die Akzeptanz des genutzten vorausschauenden Fahrerassistenzsystems über die Zeit ändert. Nach Venkatesh & Bala (2008) kann sich die *perceived Usefulness* mit wachsender Erfahrung ändern. Daraus wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich Änderungen im Fahrerakzeptanzfragebogen nach Laan et al. (1997) beobachten lassen. Diese Hypothese kann mit den vorliegenden Daten aus Kapitel 5.5.1 nicht bestätigt werden.

Insgesamt liegt das Akzeptanzniveau über den gesamten Zeitraum mit einem Mittel von ca. 1,3 für die Usefulness- und Satisfying-Skala durchgängig auf einem sehr hohen Wert. Vergleichbare Studien im Bereich des eco-Driving wie zum Beispiel bei Staubach, Schebitz, Krehle, Oeltze & Kuck (2013) sprechen bei Werten über 1,0 auf der van der Laan-Skala von einer positiven Einstellung gegenüber dem Assistenzsystem.

Die Ergebnisse sind also als sehr positiv zu werten. Da es nur wenige veröffentlichte Langzeitstudien mit Fahrerassistenzsystemen gibt und diese häufig das Nutzerverhalten und Akzeptanz des Nutzers mit ACC untersucht haben (vgl. Kapitel 5.1.3), werden vor allem die Ergebnisse der ACC-Studien zum Vergleich genutzt. Ein Verhalten mit verschiedenen Phasen der Zufriedenheit wie es Winner et al. (2003) für ACC-Systeme beschreibt (Abbildung 5-3), kann aus den vorliegenden Daten für das genutzte Assistenzsystem nicht beobachtet werden. Dies kann natürlich daran liegen, dass die Akzeptanz der Probanden nicht kontinuierlich abgefragt wird. Den ersten Fragebogen bekommen die Probanden nach ca. 20 min Fahrtzeit, die nächsten nach jeweils ca. 30 min bis 40 min Fahrtzeit mit dem Assistenzsystem. Allerdings sind die Zeiträume bei Winner qualitativ und relativ großzügig angegeben, dass es unwahrscheinlich ist, einen der Zufriedenheitsphasen zu verpassen, ohne dass sich dies in den Daten widerspiegeln würde. Genauso kann aber auch keine Steigerung der Akzeptanz gemessen werden, wie sie bei ACC-Systemen zum Beispiel von Beggiano et al. (2015) beobachtet wurde (vgl. Abbildung 5-6). Das liegt wahrscheinlich daran, dass die Akzeptanzbewertung des Fahrerassistenzsystems von Anfang an sehr positiv ist und es somit aus Sicht der Probanden kein Steigerungspotential mehr gibt oder aufgrund des Ceiling-Effekts keine Steigerung mehr möglich war, da die Probanden schon nahe der Obergrenze der Bewertungsskala waren. Ein wichtiger Unterschied zu ACC-Systemen ist auch, dass das vorausschauende Fahrerassistenzsystem keine Interaktion mit dem System verlangt. Außerdem greift es nicht in die Fahrdynamik mit ein. Dadurch kann der Fahrer das vorausschauende Assistenzsystem ignorieren und es wirkt nicht bevormundend.



### **5.6.2 Zeitliche Änderung des Fahrverhaltens**

Nach der zweiten Hypothese wird angenommen, dass sich Änderungen des Fahrverhaltens im Verlauf der einzelnen Fahrten erkennen lassen. Diese Hypothese kann basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 5.5.2 klar verneint werden. Eine Änderung des Fahrverhaltens kann durch den Lernvorgang oder durch Änderung der Akzeptanz beeinflusst werden. Wie schon im vorigen Kapitel 5.6.1 gezeigt, kann eine Änderung der Akzeptanz und eine dadurch beeinflusste Änderung des Nutzungsgrades basierend auf der Theorie des *Technology Acceptance Models* von Venkatesh & Bala (2008) nicht beobachtet werden. Entsprechend sollte eine mögliche Änderung des Fahrverhaltens nur noch auf das Lernverhalten zurückgeführt werden. Da aber eine signifikante Änderung des Fahrverhaltens (vgl. Kapitel 5.5.2.2) zwischen den verschiedenen Versuchsfahrten nicht festgestellt werden kann, kann auch ein Lernvorgang nicht nachgewiesen werden. Eine mögliche Erklärung für den nicht nachweisbaren Lernprozess ist, dass die Probanden das Fahrerassistenzsystem von Anfang an so gut mit dem System umgehen können, dass Fortschritte nicht mehr erkennbar sind. Alternativ ist die Lernkurve so steil, dass ein Unterschied zwischen der ersten zwei Fahrten nicht mehr sichtbar ist, da die erste ausgewertete Situation in der Fahrt nicht gleichzeitig das erste Mal ist, in der die Probanden das Assistenzsystem benutzen. Vor der ersten ausgewerteten Situation in der ersten assistierten Fahrt wurde schon vier Mal die Anzeige genutzt. Das bedeutet, falls ein Lernvorgang stattfinden sollte und dieser die Form einer *Power-Law-Funktion* (vgl. 5.1.1) hat, ist der Exponent  $\alpha$  der *Power-Law-Funktion* sehr groß.

### **5.6.3 Einfluss auf Fahrten ohne Assistenzsystem**

Mit der dritten Forschungsfrage soll untersucht werden, ob es einen Einfluss bei längerfristiger Nutzung des Assistenzsystems auch auf das Fahren ohne Unterstützung des Fahrers gibt. Ein Vergleich, zwischen den Fahrten ohne Assistenzsystem zum Beginn und zum Ende des Versuchszeitraums zeigten keine signifikanten Veränderungen. Genauso blieben die Unterschiede zwischen Fahrt mit und ohne Assistenzsystem signifikant bis zum Schluss. Auch wenn die Unterschiede zwischen dem Ende und Anfang des Untersuchungszeitraums nicht signifikant sind, fällt auf, dass die Fahrdaten zum Ende tendenziell dazu neigen etwas besser zu sein. Selbst wenn die Unterschiede auch bei Versuchen mit größerer Stichprobe gleichbleiben würden, bedeutet dies, dass die Effekte auf die Fahrt ohne Assistenzsystem immer noch gering sind. Bedeutender bleiben der positive Einfluss der Assistenz und damit auch ein großer Un-

terschied zu der Fahrt ohne Assistenz auch zum Ende des Versuchszeitraums. Insgesamt bedeutet dies, dass die Probanden ohne die zusätzlichen Informationen, die Ihnen das Assistenzsystem bietet, nicht deutlich verbrauchsärmer fahren können.

#### **5.6.4 Validität des Versuchsaufbaus**

Die letzte Untersuchungsfrage zieht darauf ab, ob sich einerseits der Fahrsimulator und andererseits auch der spezielle gewählte Versuchsaufbau für eine Langzeitstudie eignen. Der Vergleich der ersten Fahrt mit und der ersten Fahrt ohne Assistenzsysteme zeigt, dass es im Vergleich zu einem großen statischen Simulator, wie er in vorherigen Studien genutzt wurde (vgl. Kapitel 4), keine relativen Unterschiede gibt (vgl. Kapitel 5.5.2.1). Der Einfluss des Assistenzsystems lässt sich in den relativen Änderungen auch im reduzierten Versuchsaufbau nachweisen. Die Validierung muss aber insoweit relativiert werden, als dass nur das Verzögerungsverhalten in bestimmten Situationen untersucht wurde. Die Studie diente nicht dazu allgemein diesen Simulatorenbau für alle Untersuchungsmethoden zu validieren. Bei der Durchführung der Versuche sind keine Probleme für die Probanden zu erkennen gewesen. Die freiwillige Zeiteinteilung, dafür aber das notwendige selbständige Starten der Versuchsstrecke und eine kurze Notierung, wann ein Proband seinen Versuch durchführte, wurde von allen Versuchsteilnehmern sehr gut angenommen. Durch die dadurch nicht notwendige direkte Überwachung, fühlten sich die Probanden freier. Dies war aber nur möglich, da der Versuchsaufbau, frei in einem eigenem Raum verfügbar war und die Bedienung mit Hilfe eines einfachen Desktop-Shortcuts zum Starten des Versuchs sehr benutzerfreundlich umgesetzt war. Für den Versuch war dies von Vorteil, da es durch die mögliche freie Zeiteinteilung leichter war Probanden zu akquirieren. Außerdem war dadurch der Einfluss des Versuchsleiters auf den Probanden beschränkt. Dieses Vorgehen kann aber nur nach einer guten Einführung, um mögliche Fragen zu beantworten, gemacht werden. Auch muss bei der ersten Fahrt der Proband immer beobachtet werden um mögliche Anzeichen von Simulator Sickness zu erkennen um den Versuch abbrechen zu können, selbst wenn es sich nur um einen einzelnen PC-Aufbau mit einem Monitor handelt. Durch das größere Risiko von Simulator Sickness bei großen Simulatoren unter anderem durch das größere Gesichtsfeld (Stoner et al., 2011), wie auch aufgrund der komplizierten Bedienung dieser ist dieses Vorgehen dort nicht zu empfehlen, da hier eine kontinuierliche Überwachung durch einen Versuchsleiter unbedingt notwendig ist.

## 6 Zusammenfassung

Abseits von der generellen Erkenntnis, dass vorausschauendes Fahren hilfreich für die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und dementsprechend für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Straßenverkehr ist, ist auch bekannt, dass Fahrerassistenzsysteme den Fahrer in diesem Fall unterstützen könnten. Es gibt einige Studien die für vorausschauende Fahrerassistenzsysteme den grundsätzlichen Nachweis erbringen konnten, dass diese ein Potential besitzen den Kraftstoffverbrauch zu verringern (vgl. Kapitel 3.2). Der Hauptfrage, die noch offen war, ist, ob diese Einsparungen nachhaltig sind. Dazu wurde sowohl geprüft, ob dies abhängig von der Komplexität der Situation ist, da dies sonst eine Einschränkung der Nutzbarkeit bedeuten würde, als auch ob eine längerfristige Nutzung Änderungen im Fahrverhalten bedingt.

Die Studie zum Einfluss der Komplexität in Verkehrssituationen aus Kapitel 4 konnte zeigen, dass in Situationen in denen Einsparungen im Kraftstoffverbrauch erzielt werden können, es **keinen signifikanten Einfluss der Komplexität der Verkehrssituation auf die durch das vorausschauende Fahrerassistenzsystem erzielten Verbrauchseinsparungen gibt**, gültig für diesen Versuchsaufbau. Das bedeutet mehr visuelle Ablenkung, durch zusätzliche Verkehrsteilnehmer, mehr Informationen durch Verkehrsschilder oder visuelle Einschränkungen durch Nachtfahrten führen nur zu einer Veränderung des Blickverhaltens. Die Blickdauern auf das HMI des Fahrerassistenzsystems werden geringer bei zunehmender Komplexität. Die eigentliche Aufgabe des Fahrers vorausschauender zu Fahren wird basierend auf den Daten dieser Studie nicht beeinträchtigt. Allerdings handelt sich bei hierbei um ein Assistenzsystem das den Fahrer rein visuell informiert, wie dieser handeln soll. Es handelt sich nicht um ein eingreifendes System und auch ein Ignorieren des Systems hat keine unmittelbaren kritischen Folgen.

Mit der Studie zum Langzeitverhalten bei der Nutzung eines vorausschauenden Fahrerassistenzsystems aus Kapitel 5 konnte gezeigt werden, dass sich **keine signifikanten Änderungen über die Zeit von drei Wochen bei der Nutzung des Fahrerassistenzsystems nachweisen lassen**. Sowohl die Akzeptanzbewertungen, als auch in den Fahrdaten waren keine signifikanten Änderungen bei Fahrten mit dem Fahrerassistenzsystem nachweisbar. Die Fahrten ohne Assistenzsystem zum Ende des Versuchszeitraums deuten auch daraufhin, dass es notwendig ist, den Fahrer dauerhaft zu unterstützen. **Andernfalls nähert sich das Fahrverhalten des Fahrers wieder dem wie zum Anfang des Versuchszeitraums ohne Assistenzsystem an**.

Die Nutzung des Fahrsimulators hat sich auch in der Langzeitstudie als wirkungsvoll herausgestellt. Da diese Methodik bislang nicht für Langzeitstudien genutzt wurde sollte dies

unbedingt für zukünftige Studien in Betracht gezogen werden. Die Vorteile von Fahr simulatoren, wie Reproduzierbarkeit, genaue Einstellbarkeit, Sicherheit, Vergleichbarkeit etc. können auch hier das Studiendesign erleichtern. Die in diesem Fall gewählte Umsetzung mit dem einfachen Fahr simulatoraufbau hat den Vorteil, dass die Probanden ohne kontinuierliche Überwachung durch den Versuchsleiter frei in ihrer Zeiteinteilung die Versuche durchführen konnten. Die Validität war gegenüber dem großen Fahr simulatoraufbau aus der Komplexitätsstudie in Kapitel 4, vergleichbar. Die Validität der Kraftstoffverbrauchberechnungen im Fahr simulatoraufbau aus der Komplexitätsstudie wurden in Rommerskirchen et al. (2012) gezeigt. Die prinzipiellen Mängel einer Fahr simulatorstudie bleiben vorhanden, vor allem im Vergleich zu einem Field Operational Test (FOT). Dies sind zum einen, dass nur Teile der Realität abgebildet werden. Im Fahr simulator werden alle Fahrsituation vorher definiert, während beim FOT auch vom Versuchsleiter nicht vorhergesehene Situationen erfasst werden. Auch der Einfluss von anderen äußeren Faktoren, die bei Realfahrten auftreten können, wie zum Beispiel Ablenkung durch einen Beifahrer, Telefonate etc., konnten nicht überprüft werden. Genauso Einflüsse auf die Motivation, wie zum Beispiel Zeitdruck wurden nicht simuliert.

Dass vorausschauende Fahrerassistenzsysteme uneingeschränkt zu empfehlen sind und auch nachhaltig langfristig einen positiven Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben, konnte hiermit gezeigt werden. Erste vorausschauende Fahrerassistenzsysteme wurden auch schon von der Industrie eingeführt. Allerdings beschränken sich der „Vorausschauassistent“ von BMW (BMW AG, 2015) oder der „prädiktive Effizienzassistent“ von Audi (Audi AG, 2015) auf bekannte in digitalen Karten verzeichneten Geschwindigkeitsbegrenzungen oder auf Informationen über Kreuzungen, Kreisverkehren etc. (nur Audi). Der flächendeckenden Einführung solcher Systeme mit viel mehr als nur Geschwindigkeitsbegrenzungen stehen bislang vor allem technische Hindernisse im Weg. Einerseits muss das Fahrzeug mit entsprechenden Anzeigetechnologien, wie einem freiprogrammierbaren Kombiinstrument oder HUD ausgestattet sein. Denn zu sehr vereinfachte ikonografische Darstellungen, wie von Popiv (2012) gezeigt, können unter Umständen ihr Ziel verfehlen. Andererseits fehlen in aktuellen Fahrzeugen bislang auch noch die nötigen Daten und Kommunikationsschnittstellen wie Car2X um zum Beispiel den Ampelzustand voraussagen zu können. Zusätzlich muss ein vorausschauendes Assistenzsystem deutlich prominenter im Fahrzeug dargestellt werden und nicht, wie zum Teil bei BMW nur in bestimmten Fahrmodi (ecoPro Modus) gezeigt werden. Erst dann kann so ein Assistenzsystem seine volle Wirkung entfalten.

Eine Einschränkung der Versuchsergebnisse bleibt. Eine Untersuchung über mehrere Monate wurde nicht durchgeführt. Über eine mögliche Verhaltensänderung über so einen langen Zeitraum kann nichts vorhergesagt werden.

Die durchschnittlichen Einsparungen im Kraftstoffverbrauch liegen basierend auf den Versuchen dieser Arbeit in einer Größenordnung von ca. 10 %. Aber auch in anderen Studien (vgl. Tabelle 3-1 in Kapitel 3.2), konnten Einsparungen in dieser Größenordnung erzielt werden. Dadurch und durch die Validierung des Fahrsimulators bezüglich der Simulation des Kraftstoffverbrauchs darf von einer hohen Validität der Ergebnisse ausgegangen werden. Dies bedeutet in der Realität bei typischen Verbrennungsfahrzeugen relevante Einsparungen von meistens mehr als 0,5 l/100km.

Ein vorausschauendes Fahrerassistenzsystem ist nicht nur auf die Erfolge beim Kraftstoffverbrauch zu begrenzen, sondern hat auch positive Effekte auf den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit (vgl. Kapitel 3.2). Aber auch bei Elektrofahrzeugen sind positive Effekte auf den Energieverbrauch und damit entsprechend auf die Reichweite zu erwarten. Auch wenn hier die technischen Zusammenhänge bedingt durch den Einsatz von Elektromotoren, die auch zur Rekuperation fähig sind, anders sind, zeigen sowohl Alvarez, Lopez & De la Torre (2015), als auch Freuer (2016), dass vorausschauendes Fahren Vorteile für den Energieverbrauch bringt. Die numerischen Einsparungen im Energieverbrauch unterscheiden sich zwar von denen bei Verbrennungsmotoren, sie sind aber trotzdem auch bei E-Fahrzeugen vorhanden und deutlich nachweisbar.

Auch für zukünftige (teil-)automatisierte Fahrzeuge wird es wichtig sein den Fahrer zu informieren. Wenn diese Fahrzeuge automatisiert vorausschauend fahren, wird es aus Akzeptanzgründen notwendig bleiben, dem Fahrer dies in diesen Situationen mitzuteilen, da dieser basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit nicht selber in der Lage ist dies vorzusehen. Denn nur, wenn der Fahrer versteht wieso das Fahrzeug schon handelt, ohne dass das dem Fahrer ohne Hilfsmittel ersichtlich werden kann, kann auch die Akzeptanz hoch sein.

## Literaturverzeichnis

- ADAC, Hrsg. (2015). *ADAC Eco-Training*. Zugriff am 01.04.2015. Verfügbar unter [http://www.adac.de/\\_mmm/pdf/ADAC%20Eco-Training\\_Produktblatt\\_197212.pdf](http://www.adac.de/_mmm/pdf/ADAC%20Eco-Training_Produktblatt_197212.pdf).
- ADAC, Hrsg. (2017). *Sparen beim Fahren: Die Fahrweise hat den größten Einfluss auf den Verbrauch*. Verfügbar unter <https://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/spritsparen/sparen-beim-fahren-antwort-1.aspx>.
- Adell, E. (2010). Acceptance of Driver Support Systems, *Proc. 2nd European Conference on Human Centred Design of Intelligent Transport Systems (HUMANIST)* (S. 475–486). Berlin.
- 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. DOI: 10.1016/j.trf.2007.05.006
- Ahlstrom, C. & Kircher, K. (2017). Changes in glance behaviour when using a visual eco-driving system – A field study. *Applied Ergonomics*, 58, 414-423. DOI: 10.1016/j.apergo.2016.08.001
- Alam, M. S. & McNabola, A. (2014). A critical review and assessment of Eco-Driving policy & technology: Benefits & limitations. *Transport Policy*, 35, 42-49. DOI: 10.1016/j.transpol.2014.05.016
- Alessandrini, A., Orecchini, F., Ortenzi, F. & Villatico Campbell, F. (2009). Drive-style emissions testing on the latest two Honda hybrid technologies. *Eur. Transp. Res. Rev.*, 1 (2), 57-66. DOI: 10.1007/s12544-009-0008-3
- Alvarez, R., Lopez, A. & De la Torre, N. (2015). Evaluating the effect of a driver's behaviour on the range of a battery electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 229 (10), 1379-1391. DOI: 10.1177/0954407014561483
- Arndt, S. (2011). *Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen: Modell zum Kaufverhalten von Endkunden* (VS research - Verkehrspsychologie, 1. Aufl). Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.

- Audi AG, Hrsg. (2015). *Audi A4 Prädiktiver Effizienzassistent*. Verfügbar unter <http://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/fahrerassistenzsysteme/audi-a4-praediktiver-effizienzassistent-de>.
- Bär, T., Kohlhaas, R., Zöllner, J. M. & Scholl, K.-U. (2011). Anticipatory driving assistance for energy efficient driving, In *IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, Wien.
- Barbuto, J. E. & Scholl, R. W. (1998). Motivation Sources Inventory: Development and Validation of New Scales to Measure an Integrative Taxonomy of Motivation. *Psychological Reports*, 82 (3), 1011-1022. DOI: 10.2466/pro.1998.82.3.1011
- Barkenbus, J. N. (2010). Eco-driving: An overlooked climate change initiative. *Energy Policy*, 38 (2), 762-769. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.10.021
- Beggiato, M., Pereira, M., Petzoldt, T. & Krems, J. (2015). Learning and development of trust, acceptance and the mental model of ACC. A longitudinal on-road study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 35, 75-84. DOI: 10.1016/j.trf.2015.10.005
- Benda, H. von. (1977). Die Skalierung der Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen. I. Teil: Ein Klassifikationssystem für Verkehrssituationen aus Fahrersicht. *FP*, 7320
- Bengler, K. (2007). Subject Testing for Evaluation of Driver Information Systems and Driver Assistance Systems — Learning Effects and Methodological Solutions. In P. C. Cacciabue (Hrsg.), *Modelling driver behaviour in automotive environments. Critical issues in driver interactions with intelligent transport systems* (S. 123–134). London: Springer.
- Bengler, K., Dietmayer, K., Färber, B., Maurer, M., Stiller, C. & Winner, H. (2014). Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives. *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.*, 6 (4), 6-22. DOI: 10.1109/MITS.2014.2336271
- Beusen, B., Broekx, S., Denys, T., Beckx, C., Degraeuwe, B., Gijssbers, M. et al. (2009). Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14 (7), 514-520. DOI: 10.1016/j.trd.2009.05.009
- Birrell, S. A., Fowkes, M. & Jennings, P. A. (2014a). Effect of Using an In-Vehicle Smart Driving Aid on Real-World Driver Performance. *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, 15 (4), 1801-1810. DOI: 10.1109/TITS.2014.2328357

- Birrell, S. A., Taylor, J., McGordon, A., Son, J. & Jennings, P. (2014b). Analysis of three independent real-world driving studies: A data driven and expert analysis approach to determining parameters affecting fuel economy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 33, 74-86. DOI: 10.1016/j.trd.2014.08.021
- Blaauw, G. (1982). Driving Experience and Task Demands in Simulator and Instrumented Car: A Validation Study. *Human Factors (Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society)*, 24 (4), 473-486. DOI: 10.1177/001872088202400408
- Blana, E. (2001). *The behavioural validation of driving simulators as research tools: a case study based on the Leeds Driving Simulator*. PhD Thesis, The University of Leeds. Leeds, UK
- Blana, E. (1996a). *A Survey of Driving Research Simulators Around the World* (Working Paper Nr. 481). Leeds, UK: Institute of Transport Studies, University of Leeds.
- Blana, E. (1996b). *Driving Simulator Validation Studies: A Literature Review* (Working Paper Nr. 480). Leeds, UK: The University of Leeds.
- BMW AG, Hrsg. (2015). *Fahrdynamik & Effizienz im neuen BMW 7er*. Verfügbar unter <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/7er/limousine/2015/fahrdynamik-effizienz.html>.
- Boriboonsomsin, K., Vu, A. & Barth, M. (2010). *Eco-Driving: Pilot Evaluation of Driving Behavior Changes Among U.S. Drivers*. Riverside, CA, USA: University of California Transportation Center.
- Braess, H.-H. & Donges, E. (2006). Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - „Konsumierbare“ oder echte Verbesserungen?, In 2. *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, München.
- Braess, H.-H., Zinke, E., Nettelau, H.-J., Fritzsche, E. & Seiffert, U. (2013). Anforderungen, Zielkonflikte. In H.-H. Braess (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (ATZ, 7., aktual. Aufl., S. 11–46). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bubb, H. (2015a). Das Regelkreisparadigma der Ergonomie. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (ATZ/MTZ-Fachbuch, Aufl. 2015, S. 27–65). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Bubb, H. (2015b). Methoden der ergonomischen Fahrzeugentwicklung. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (ATZ/MTZ-Fachbuch, Aufl. 2015, S. 583–616). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.



- Bubb, H. & Bengler, K. (2015). Fahrerassistenz. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (ATZ/MTZ-Fachbuch, Aufl. 2015, S. 525–582). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Bubb, H., Vollrath, M., Reinprecht, K., Mayer, E. & Körber, M. (2015). Der Mensch als Fahrer. In H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen & M. Vollrath (Hrsg.), *Automobilergonomie* (ATZ/MTZ-Fachbuch, Aufl. 2015, S. 67–162). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Hrsg. (2014). *Internationale Klimapolitik*. Verfügbar unter <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/>.
- Carlson, R., Lohse-Busch, H. & Douba, M. (2011). Drive Cycle Fuel Consumption Variability of Plug-In Hybrid Vehicles Due to Aggressive Driving. In R. K. Jurgen (Hrsg.), *Electric and hybrid-electric vehicles* (Progress in technology. Automotive electronics series, PT 143/1-143/5, [New ed.], S. 81–88). Warrendale, Pa.: SAE International.
- Carsten, O. & Jamson, A. H. (2011). Driving Simulators as Research Tools in Traffic Psychology. In B. E. Porter (Hrsg.), *Handbook of traffic psychology* (1st ed., S. 87–96). London, Waltham, MA: Academic Press.
- Castermans, J., Brusselmans, A. & Pandazis, J.-C. (2010). *D1.2: Project presentation and fact sheet* eCoMove - Cooperative Mobility Systems and Services for Energy Efficiency, Hrsg.
- Chowdhury, H., Alam, F., Khan, I., Djamovski, V. & Watkins, S. (2012). Impact of Vehicle add-ons on Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions. *Procedia Engineering*, 49, 294-302. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.10.140
- Corcoba Magaña, V. & Muñoz-Organero, M. (2015). GAFU: Using a Gamification Tool to Save Fuel. *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.*, 7 (2), 58-70. DOI: 10.1109/MITS.2015.2408152
- Crundall, D. E. & Underwood, G. D. M. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, 41 (4), 448-458. DOI: 10.1080/001401398186937
- Daun, T., Braun, D., Frank, C., Haug, S. & Lienkamp, M. (2013). Evaluation of Driving Behavior and the Efficacy of a Predictive Eco-Driving Assistance System for Heavy Commercial

- Vehicles in a Driving Simulator Experiment, In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2013. 6-9 Oct. 2013, Kurhaus, The Hague, The Netherlands.
- Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13 (3), 319. DOI: 10.2307/249008
- Degraeuwe, B. & Beusen, B. (2013). Corrigendum on the paper “Using on-board data logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course”. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 19, 48-49. DOI: 10.1016/j.trd.2012.11.003
- Deterding, S., Khaled, R., Nacke, L. E. & Dixon, D. (2011). Gamification: Toward a Definition. In D. Tan (Hrsg.), *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (ACM Digital Library ). New York, NY: ACM.
- Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR). (2006). *Fahrerassistenzsysteme: Beschluss des Gesamtvorstands vom 03. November 2006 auf der Basis der Empfehlung des Ausschusses für Fahrzeugtechnik*.
- Deutschle, S. (2005). Wer fährt? -Der Fahrer oder das System?: Technische Grundlagen von Fahrerassistenzsystemen. *Straßenverkehrsrecht* (7), 249-253.
- Dogan, E., Steg, L. & Delhomme, P. (2011). The influence of multiple goals on driving behavior: The case of safety, time saving, and fuel saving. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (5), 1635-1643. DOI: 10.1016/j.aap.2011.03.002
- Donges, E. (1982). Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, 82 (2), 183-190.
- Donges, E. (1999). A Conceptual Framework for Active Safety in Road Traffic. *Vehicle System Dynamics*, 32 (2-3), 113-128. DOI: 10.1076/vesd.32.2.113.2089
- Donges, E. (2009). Fahrerhaltensmodelle. In H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (ATZ-MTZ-Fachbuch, 1. Aufl., S. 15–23). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Dorrer, C. (2003). *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen*. Dissertation, Universität Stuttgart. Stuttgart

- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das Gedächtnis: Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*. Leipzig: Verlag von Duncker & Humblot.
- 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. DOI: 10.1016/S1361-9209(01)00003-7
- Ericsson, E., Larsson, H. & Brundell-Freij, K. (2006). Optimizing route choice for lowest fuel consumption – Potential effects of a new driver support tool. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14 (6), 369-383. DOI: 10.1016/j.trc.2006.10.001
- Europäische Kommission. (1993). Richtlinie 93/ 116/EG der Kommission vom 17 . Dezember 1993 zur Anpassung der Richtlinie 80/1268/EWG des Rates über den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt, *Amtsblatt der Europäischen Union*. Verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/ALL/?uri=CELEX%3A31993L0116>.
- Europäische Kommission. (2012). Verordnung (EU) Nr. 65/2012 der Kommission vom 24. Januar 2012 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf Gangwechselanzeiger und zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, *Amtsblatt der Europäischen Union*. Verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/ALL/?uri=CELEX:32012R0065>.
- Evans, L. (1979). Driver Behavior Effects on Fuel Consumption in Urban Driving. *Human Factors (Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society)*, 21 (4), 389-398. DOI: 10.1177/001872087902100401
- Faber, F., Jonkers, E., van Noort, M., Benmimoun, M., Pütz, A., Metz, B. et al. (2012). *Deliverable 6.5 and 6.6: Final results: impacts on traffic efficiency and environment euroFOT*, Hrsg.
- Fastenmeier, W. (Hrsg.). (1995). *Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme*. Köln, Bonn: Verlag TÜV Rheinland; Deutscher Psychologen-Verlag.
- Fastenmeier, W., Reichart, G. & Haller, R. (1992). Welche Informationen brauchen Fahrer wirklich?, In *Das Mensch-Maschine-System im Verkehr. Tagung Berlin, 19. und 20. März 1992*, Berlin.

- Fenn, J. (2006). *Understanding Gartner's Hype Cycles, 2006* (Gartner Research Nr. G00138430). : Gartner Inc.
- Fiat Group Automobiles S.p.A. (2010). *ECO-Driving Uncovered: The benefits and challenges of eco-driving, based on the study using real journey data.*
- Fitch, G. M., Blanco, M., Morgan, J. F. & Wharton, A. E. (2010). Driver Braking Performance to Surprise and Expected Events. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 54 (24), 2075-2080. DOI: 10.1177/154193121005402412
- Fitts, P. M. & Posner, M. I. (1967). *Human Performance* (Basic Concepts in Psychology Series). Belmont, CA: Brooks/Cole Publishing Company.
- Flehmig, F., Kästner, F., Knödler, K. & Knoop, M. (2015). Eco-ACC für Elektro- und Hybridfahrzeuge. In W. Siebenpfeiffer (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme und Effiziente Antriebe* (ATZ/MTZ--Fachbuch, S. 11–17). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- FOT-NET. (2014). *FESTA Handbook: Version 5.*
- Freuer, A. (2016). *Ein Assistenzsystem für die energetisch optimierte Längsführung eines Elektrofahrzeugs* (Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Froehlich, J. E. (2014). Gamifying Green: Gamification and Environmental Sustainability. In S. P. Walz & S. Deterding (Hrsg.), *The gameful world. Approaches, issues, applications* (S. 563–596). Cambridge, Mass. [u.a.]: MIT Press.
- Garay-Vega, L. & Fisher, D. L. (2005). Can Novice Drivers Recognize Foreshadowing Risks as Easily as Experienced Drivers?, In *Proceedings of the 3rd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design. Driving assessment 2005*, Samoset Resort on the Ocean, Rockport, Maine, USA.
- Geyer, S., Baltzer, M., Franz, B., Hakuli, S., Kauer, M., Kienle, M. et al. (2014). Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance. *IET Intell. Transp. Syst.*, 8 (3), 183-189. DOI: 10.1049/iet-its.2012.0188
- Godley, S. T., Triggs, T. J. & Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident Analysis & Prevention*, 34 (5), 589-600. DOI: 10.1016/S0001-4575(01)00056-2

- Gonder, J., Earleywine, M. & Sparks, W. (2012). Analyzing Vehicle Fuel Saving Opportunities through Intelligent Driver Feedback. *SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst.*, 5 (2), 450-461. DOI: 10.4271/2012-01-0494
- Hale, A. R., Stoop, J. & Hommels, J. (1990). Human error models as predictors of accident scenarios for designers in road transport systems. *Ergonomics*, 33 (10-11), 1377-1387. DOI: 10.1080/00140139008925339
- Hari, D., Brace, C. J., Vagg, C., Poxon, J. & Ash, L. (2012). Analysis of a Driver Behaviour Improvement Tool to Reduce Fuel Consumption, In *International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2012*, Beijing, China.
- Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, 52, 139-183. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9
- Hilbig, W. (1984). Akzeptanzforschung neuer Bürotechnologien: Ergebnisse einer empirischen Fallstudie. *Office Management*, 32 (4), 320-323.
- Hof, T., Conde, L., Garcia, E., Iviglia, A., Jamson, S., Jopson, A. et al. (2014). *D11.1: A state of the art review and user's expectations*. : ecoDriver Project.
- Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis: Die Funktion von Antizipationen in der menschlichen Verhaltenssteuerung und Wahrnehmung*. Göttingen, Seattle: Hogrefe.
- Hoffmann, S. & Buld, S. (2006). Darstellung und Evaluation eines Trainings zum Fahren in der Fahrsimulation, *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. Tagung Wolfsburg, 12. und 13. Oktober 2006* (VDI-Berichte, Bd. 1960, S. 113-132). Düsseldorf: VDI-Verl.
- Hofmann, P. & Rinkenauer, G. (2013). Response preparation in a lane change task. *Ergonomics*, 56 (2), 268-281. DOI: 10.1080/00140139.2012.760752
- Hülsebusch, D., Salfeld, M., Ponomarev, I. & Gauterin, F. (2013). The impact of energy efficient driving strategies on rear-end safety, In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2013. 6-9 Oct. 2013, Kurhaus, The Hague, The Netherlands*.
- International Transport Forum, Hrsg. (2007). *Workshop on Ecodriving: Findings and Messages for Policy Makers*. Verfügbar unter <http://www.internationaltransportforum.org/Proceedings/ecodriving/EcoConclus.pdf>.

- ISO. (2003), DIN EN ISO 15007-1. *Road vehicles – Measurement of driver visual behaviour with respect to transport information and control systems – Part 1: Definitions and parameters.*
- ISO. (2010), ISO 26022. *Road vehicles — Ergonomic aspects of transport information and control systems — Simulated lane change test to assess invehicle secondary task demand.*
- Jackson, L., Chapman, P. & Crundall, D. (2009). What happens next? Predicting other road users' behaviour as a function of driving experience and processing time. *Ergonomics*, 52 (2), 154-164. DOI: 10.1080/00140130802030714
- Jamson, H. (2011). Cross-Platform Validation Issues. In D. L. Fisher (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Jamson, S. L., Hibberd, D. L. & Jamson, A. H. (2015). Drivers' ability to learn eco-driving skills; effects on fuel efficient and safe driving behaviour. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 657-668. DOI: 10.1016/j.trc.2015.02.004
- Jenness, J. W., Singer, J., Walrath, J. & Lubar, E. (2009). *Fuel Economy Driver Interfaces: Design Range and Driver Opinions (Report on Task 1 and Task 2)* ( Nr. DOT HS 811 092). : National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation (DOT).
- Kaptein, N. A., Theeuwes, J. & Horst, R. van der. (1996). Driving Simulator Validity: Some Considerations. *Transportation Research Record*, 1550 (1), 30-36. DOI: 10.3141/1550-05
- Kondzior, M. (2016). *Methode zur Erfassung der Akzeptanz eines Systems: Deutsche Übersetzung des Fragebogens von Laan, J. D. van der, Heino, A. & Waard, D. de. (1997).* Verfügbar unter [http://www.hfes-europe.org/accept/accept\\_de.htm](http://www.hfes-europe.org/accept/accept_de.htm).
- Kopf, M. & Simon, J. (2001). A Concept for a Learn-Adaptive Advanced Driver Assistance System. In R. Onken (Hrsg.), *8th Conference on Cognitive Science Approaches to Process Control. The Cognitive Work Process: Automation and Interaction* (DGLR-Bericht, Bd. 2001,4, (2. Ed.), S. 81–91). Bonn: DGLR.
- Krause, M. & Bengler, K. (2012). Traffic Light Assistant - Driven in a Simulator, In *Proceedings IEEE IV Symposium Workshop*, Madrid.

- Kraxner, D., Brüstle, C. & Striebich, H. (1997). Einfluß von Fahrzeug, Antrieb und Fahrer auf den Kraftstoffverbrauch - eine methodische Analyse. In U. Essers (Hrsg.), *Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren. 2. Stuttgarter Symposium 18.-20. Februar 1997* (S. 742-755). Renningen: Expert-Verlag.
- Kurani, K. S., Stillwater, T., Jones, M. & Caperello, N. (2013). *Ecodrive I-80: A Large Sample Fuel Economy Feedback Field Test: Final report* ( Nr. ITS-RR-13-15). Davis, CA, USA: Institute of Transportation Studies; University of California, Davis.
- Küster, U. & Reiter, K. (1987). *Technikwissen und Fahrverhalten junger Fahrer: Eine empirische Studie* (Bundesanstalt für Straßenwesen / Bereich Unfallforschung: Forschungsberichte der ..., Bd. 160). Bergisch Gladbach
- Laan, J. D. van der, Heino, A. & Waard, D. de. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5 (1), 1-10. DOI: 10.1016/S0968-090X(96)00025-3
- Lange, C., Schmitt, G., Zell, A., Arcati, A., Bubb, H. & Bengler, K. (2010). Haptischer Schaltpunkthinweis am aktiven Gaspedal - Realversuche zur Parametrisierung, Variantenauswahl und zur Bestimmung des Potentials zur Verbrauchsreduzierung, In *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*, München.
- Laquai, F. (2014). *Anticipation Assistance For Drivers*. Dissertation, Technische Universität München. München
- Laquai, F., Chowanetz, F. & Rigoll, G. (2011). A large-scale LED array to support anticipatory driving, In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2011*, Anchorage, Alaska, USA.
- LeBlanc, D., Sivak, M. & Bogard, S. (2010). *Using Naturalistic Driving Data to Assess Variations in Fuel Efficiency among Individual Drivers*. Ann Arbor, Michigan, USA: The University of Michigan (UMTRI).
- Lütteken, N., Zimmermann, M. & Bengler, K. (2016). Using Gamification to Motivate Human Cooperation in a Lane-change Scenario, In *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Rio de Janeiro.
- Makower, J. (2012). *State of Green Business 2012* GreenBiz group, Hrsg.

- Michon, J. A. (1986). A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? In L. Evans & R. C. Schwing (Hrsg.), *Human Behavior and Traffic Safety* (S. 485–524). Boston, MA: Springer US.
- Mierlo, J. van, Maggetto, G., Burgwal, E. van de & 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. DOI: 10.1243/095440704322829155
- Mohra, H. R. (2014). *Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung einer energieeffizienten Fahrweise* (Fahrzeugtechnik). München: Dr. Hut (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2013).
- Mullen, N., Charlton, J., Devlin, A. & Bédard, M. (2011). Simulator Validity: Behaviors Observed on the Simulator and on the Road. In D. L. Fisher (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (13-1 - 13-18). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Muñoz-Organero, M. & Corcoba Magaña, V. (2013). Validating the Impact on Reducing Fuel Consumption by Using an EcoDriving Assistant Based on Traffic Sign Detection and Optimal Deceleration Patterns. *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, 14 (2), 1023-1028. DOI: 10.1109/TITS.2013.2247400
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation (DOT). (2013). *Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines for In-Vehicle Electronic Devices* National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Hrsg.
- Negele, H. (2007). *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahr simulatoren für die Fahrzeugentwicklung*. Dissertation, Technische Universität München. München
- Newell, A. & Rosenbloom, P. S. (1981). Mechanisms of Skill Acquisition and the Law of Practice. In J. R. Anderson (Hrsg.), *Cognitive Skills and Their Acquisition*. Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Newell, K. M., Liu, Y.-T. & Mayer-Kress, G. (2001). Time scales in motor learning and development. *Psychological Review*, 108 (1), 57-82. DOI: 10.1037/0033-295X.108.1.57
- Nöcker, G., Mezger, K. & Kerner, B. (2005). Vorausschauende Fahrerassistenzsysteme. In M. Maurer & C. Stiller (Hrsg.), 3. *Workshop Fahrerassistenzsysteme* (S. 151–163)



- Patten, C. J., Kircher, A., Östlund, J., Nilsson, L. & Svenson, O. (2006). Driver experience and cognitive workload in different traffic environments. *Accident Analysis & Prevention*, 38 (5), 887-894. DOI: 10.1016/j.aap.2006.02.014
- Pelkmans, L. & Debal, P. (2006). Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11 (4), 233-241. DOI: 10.1016/j.trd.2006.04.001
- Pereira, M., Beggiato, M. & Petzoldt, T. (2015). Use of adaptive cruise control functions on motorways and urban roads: Changes over time in an on-road study. *Applied Ergonomics*, 50, 105-112. DOI: 10.1016/j.apergo.2015.03.002
- Petzoldt, T. & Krems, J. F. (2014). How does a lower predictability of lane changes affect performance in the Lane Change Task? *Applied Ergonomics*, 45 (4), 1218-1224. DOI: 10.1016/j.apergo.2014.02.013
- Pischinger, F., Adomeit, P., Dorenkamp, R., Schindler, K.-P., Baar, R., Gumpoltsberger, G. et al. (2013). Antriebe. In H.-H. Braess (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (ATZ, 7., aktual. Aufl., S. 221-496). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Plavšić, M. (2010). *Analysis and Modeling of Driver Behavior for Assistance Systems at Road Intersections*. Dissertation, Technische Universität München. München
- Popiv, D. (2012). *Enhancement of Driver Anticipation and Its Implications on Efficiency and Safety*. Dissertation, TU München. München
- Popiv, D., Hajek, H., Rakic, M. & Bengler, K. (2010a). Einfluss eines multimodalen Fahrerassistenzsystems zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch verbesserte Antizipation, In 5. *Fachtagung USEWARE*, Baden-Baden.
- Popiv, D., Rakic, M. & Bengler, K. (2011). Driver's natural anticipation horizon in deceleration situations. In H. M. Khalid & A. Hedge (Hrsg.), *Advances in ergonomics modeling and usability evaluation* (Advances in Human Factors and Ergonomics Series, S. 550-560). Boca Raton: CRC Press.
- Popiv, D., Rakic, M., Nestler, S., Bengler, K. & Bubb, H. (2009). Timing concept for assistance of anticipatory driving, In *Proceedings of the 17th World Congress on Ergonomics, IEA2009*, Beijing, China.

- Popiv, D., Rommerskirchen, C., Rakic, M., Duschl, M. & Bengler, K. (2010b). Effects of assistance of anticipatory driving on driver's behaviour during deceleration situations, *Proc. 2nd European Conference on Human Centred Design of Intelligent Transport Systems (HUMANIST)* . Berlin.
- Qian, G. & Chung, E. (2011). Evaluating effects of eco-driving at traffic intersections based on traffic micro-simulation. In P. Tisato, L. Oxlad & M. Taylor (Hrsg.), *Australasian Transport Research Forum 2011 Proceedings*
- Radlmayr, J., Selzer, T., Arcati, A. & Bengler, K. (2015). Haptic Gear Shifting Indication: Evaluating Acceptance and Potential Fuel Consumption Reduction. *Procedia Manufacturing*, 3, 2746-2752. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.694
- Rakotonirainy, A., Haworth, N., Saint Pierre, G. & Delhomme, P. (2011). Research issues in Eco-driving, In *22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Washington, DC.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., SMC-13* (3), 257-266. DOI: 10.1109/TSMC.1983.6313160
- Rauch, N. (2009). *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext*. Dissertation, Universität Würzburg. Würzburg
- Redsell, M., Lucas, G. G. & Ashford, N. J. (1993). Factors affecting car fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 207 (14), 1-22. DOI: 10.1243/PIME\_PROC\_1993\_207\_155\_02
- Regan, M. A., Young, K. L., Lee, J. D. & Gordon, C. (2009). Sources of Driver Distraction. In M. A. Regan, J. D. Lee & K. L. Young (Hrsg.), *Driver distraction. Theory, effects, and mitigation* (S. 249–280). Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Reichart, G., Friedmann, S., Dorrer, C., Rieker, H., Drechsel, E. & Wermuth, G. (1998). *Potentials of BMW Driver Assistance to Improve Fuel Economy*. Paris: FISITA.
- Repmann, C., Eilemann, A., Pantow, E., Wawzyniak, M., Ayoubi, M. & Seiffert, U. (2013). Fahrzeugphysik. In H.-H. Braess (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (ATZ, 7., aktual. Aufl., S. 47–118). Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Rommerskirchen, C. & Bengler, K. (2012). Merging navigation and anticipation assistance for fuel-saving, *Advances in Human Aspects of Road and Rail Transportation* (Advances in Human Factors and Ergonomics Series, S. 298–307). CRC Press.
- Rommerskirchen, C. & Bengler, K. (2014). Ein Head-up-Display zur Unterstützung des vorausschauenden Fahrens zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs im PKW. In M. Jäger (Hrsg.), *Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft. Bericht zum 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 12. - 14. März 2014 [TU und Hochschule München]* (Bd. 2014, Als Ms. gedr, S. 100–102). Dortmund: GFA-Press.
- Rommerskirchen, C., Helmbrecht, M. & Bengler, K. (2013). Increasing complexity of driving situations and its impact on an ADAS for anticipatory assistance for the reduction of fuel consumption, In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE*, Gold Coast, Australia.
- Rommerskirchen, C., Helmbrecht, M. & Bengler, K. (2014). The Impact of an Anticipatory Eco-Driver Assistant System in Different Complex Driving Situations on the Driver Behavior. *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.*, 6 (2), 45-56. DOI: 10.1109/MITS.2014.2307078
- Rommerskirchen, C., Müller, T. & Bengler, K. (2012). Validation of fuel consumption calculated by a driving simulator. In S. Espié, A. Kemeny & F. Mérienne (Hrsg.), *Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe 2012. September 6-7, 2012, Arts et métiers Paris-Tech, France* (A 134, S. 359–361). Bron: INRETS.
- Rumbolz, P. (2013). *Untersuchung der Fahrereinflüsse auf den Energieverbrauch und die Potentiale von verbrauchsreduzierenden Verzögerungsassistentenfunktionen beim PKW* (Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart, Bd. 71). Renningen: Expert-Verl.
- Sagberg, F., Eenik, R., Hoedemaeker, M., Lotan, T., van Nes, N., Smokers, R. et al. (2011). *Recommendations for a large-scale European naturalistic driving observation study.: PROLOGUE Deliverable D4.1*. Oslo, Norway: TØI Institute of Transport Economics,.
- Saint Pierre, G., Brouwer, R., Hogema, J., Kuiper, O., Seewald, P., Mejuto, P. et al. (2016). *D43.1: Eco-driving in the real-world: behavioural, environmental and safety impacts eco-Driver Project*, Hrsg.

- Samper, K. & Kuhn, K. P. (2009). Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch ein vorausschauendes Assistenzsystem. In Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.), *Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit* (VDI-Berichte, Bd. 2085, Nichtred. Ms.-Dr, Bd. 2001, S. 79–93). Düsseldorf: VDI-Verl.
- Sanchez, D., Garcia, E., Saez, M., Benmimoun, M., Pütz, A., Aust, M. L. et al. (2012). *Deliverable 6.3: Final results: User acceptance and user-related aspects euroFOT*, Hrsg.
- Schall, D. L. & Mohnen, A. (2015). Incentives for Energy-efficient Behavior at the Workplace: A Natural Field Experiment on Eco-driving in a Company Fleet. *Energy Procedia*, 75, 2626–2634. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.348
- Schmidt, G. & Liebl, J. (2001). Senkung der Pkw-CO<sub>2</sub>-Emission — wirksame Maßnahmen für alle Betriebsbedingungen. *MTZ Motortech Z*, 62 (6), 482–489. DOI: 10.1007/BF03227346
- Schömig, N., Metz, B. & Krüger, H.-P. (2011). Anticipatory and control processes in the interaction with secondary tasks while driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14 (6), 525–538. DOI: 10.1016/j.trf.2011.06.006
- Schröer, A. (1984). Der individuelle Einfluß des Fahrers auf das Emissionsverhalten des Fahrzeuges, *Emissionsminderung Automobilabgase, Ottomotoren. Tagung, Nürnberg 1984* (VDI-Berichte, Bd. 531, S. 489–505). Düsseldorf 1984: VDI Verlag.
- Schweigert, M. (2002). *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*. Dissertation, TU München. München
- Simon, J. (2005). *Learning to drive with Advanced Driver Assistance Systems: Empirical studies of an online tutor and a personalised warning display on the effects of learnability and the acquisition of skill*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz. Chemnitz
- Sipl, F. (2014). *Driving Simulator Study on the Long-term Effects of an Anticipatory ADAS*. Bachelorarbeit, Technische Universität München. München
- Sivak, M. & Schoettle, B. (2011). *Eco-Driving: Strategic, Tactical, and Operational Decisions of the Driver that Improve Vehicle Fuel Economy* ( Nr. UMTRI-2011-34). Ann Arbor, Michigan, USA: The University of Michigan (UMTRI).
- Snoddy, G. S. (1926). Learning and stability: a psychophysiological analysis of a case of motor learning with clinical applications. *Journal of Applied Psychology*, 10 (1), 1–36. DOI: 10.1037/h0075814

- Sodhi, M., Reimer, B. & Llamazares, I. (2002). Glance analysis of driver eye movements to evaluate distraction. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 34 (4), 529-538. DOI: 10.3758/BF03195482
- Sommer, K. (2013). *Vorausschauendes Fahren: Erfassung, Beschreibung und Bewertung von Antizipationsleistungen im Straßenverkehr*. Dissertation, Universität Regensburg. Regensburg
- Stahl, P., Donmez, B. & Jamieson, G. A. (2013). Anticipatory driving competence: Motivation, Definition & Modeling. In J. Terken (Hrsg.), *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Eindhoven, 2013* (S. 286–291). New York, New York: Association for Computing Machinery.
- Stahl, P., Donmez, B. & Jamieson, G. A. (2014a). A Model of Anticipation in Driving: Processing Pre-event Cues for Upcoming Conflicts. In L. N. Boyle (Hrsg.), *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. AutomotiveUI 2014 : 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications : September 17-19, 2014, Seattle, Washington, USA* (S. 1–8)
- Stahl, P., Donmez, B. & Jamieson, G. A. (2014b). Anticipation in Driving: The Role of Experience in the Efficacy of Pre-event Conflict Cues. *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.*, 44 (5), 603-613. DOI: 10.1109/THMS.2014.2325558
- Statistisches Bundesamt (Destatis). (2014). *Verkehrsunfälle - Fachserie 8 Reihe 7 - 2013*.
- Staubach, M., Schebitz, N., Krehle, T., Oeltze, K. & Kuck, D. (2013). User acceptance of an eco-driving support system, In *Proceedings of the 9th ITS European Congress*, Dublin, Ireland.
- Steinberg, P. & Goßlau, D. (2015). Kraftstoffverbrauch. In R. van Basshuysen (Hrsg.), *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven* (ATZ/MTZ-Fachbuch, 7., vollst. überarb. und erw. Aufl., S. 1013–1041). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Stillwater, T. & Kurani, K. S. (2013). Drivers discuss ecodriving feedback: Goal setting, framing, and anchoring motivate new behaviors. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 19, 85-96. DOI: 10.1016/j.trf.2013.03.007

- Stoner, H., Fisher, D. L. & Mollenhauer, M. (2011). Simulator and Scenario Factors Influencing Simulator Sickness. In D. L. Fisher (Hrsg.), *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (14-1 - 14-24). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Tanida, K. & Pöppel, E. (2006). A hierarchical model of operational anticipation windows in driving an automobile. *Cogn Process*, 7 (4), 275-287. DOI: 10.1007/s10339-006-0152-9
- Thijssen, R., Hofman, T. & Ham, J. (2014). Ecodriving acceptance: An experimental study on anticipation behavior of truck drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 22, 249-260. DOI: 10.1016/j.trf.2013.12.015
- Totzke, I. (2012). *Einfluss des Lernprozesses auf den Umgang mit menügesteuerten Fahrerinformationssystemen*. Dissertation, Universität Würzburg. Würzburg
- Umweltbundesamt. (2008). *Sprit sparen und mobil sein – trotz hoher Benzin und Dieselpreise: Neun Tipps vom Umweltbundesamt*. Dessau. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/press/pdo8-053.pdf>.
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2012). *Umweltbundesamt: Daten zum Verkehr: Ausgabe 2012*.
- Várhelyi, A., Hjalmdahl, M., Hydén, C. & Draskóczy, M. (2004). Effects of an active accelerator pedal on driver behaviour and traffic safety after long-term use in urban areas. *Accident Analysis & Prevention*, 36 (5), 729-737. DOI: 10.1016/j.aap.2003.06.001
- Venkatesh, V. (2000). Determinants of Perceived Ease of Use: Integrating Control, Intrinsic Motivation, and Emotion into the Technology Acceptance Model. *Information Systems Research*, 11 (4), 342-365. DOI: 10.1287/isre.11.4.342.11872
- Venkatesh, V. & Bala, H. (2008). Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. *Decision Sciences*, 39 (2), 273-315. DOI: 10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI). (2002) VDI-Richtlinien, VDI 4006. *Menschliche Zuverlässigkeit Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Verwey, W. B. (2000). On-line driver workload estimation. Effects of road situation and age on secondary task measures. *Ergonomics*, 43 (2), 187-209. DOI: 10.1080/001401300184558
- Vlieger, I. de. (1997). On board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars. *Atmospheric Environment*, 31 (22), 3753-3761. DOI: 10.1016/S1352-2310(97)00212-4

- Vlieger, I. de, Keukeleere, D. de & Kretzschmar, J. (2000). Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. *Atmospheric Environment*, 34 (27), 4649-4655. DOI: 10.1016/S1352-2310(00)00217-X
- Wählberg, A. E. af. (2007). Long-term effects of training in economical driving: Fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37 (4), 333-343. DOI: 10.1016/j.ergon.2006.12.003
- Wallentowitz, H. & Neunzig, D. M. (2001). Reduzierung der Schadstoffbelastungen. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift)*, 103 (1), 50-57. DOI: 10.1007/BF03224348
- Waters, M. H. L. & Laker, I. B. (1980). *Research on Fuel Conservation for Cars* Transport and Road Research Laboratory, Hrsg. (TRRL LABORATORY REPORT Nr. 921). Crowthorne, Berkshire: Department of the Environment Department of Transport.
- Weinberger, M. (2000). *Der Einfluß von Adaptive Cruise Control auf das Fahrerverhalten*. Dissertation, Technische Universität München. München
- Weinberger, M., Winner, H. & Bubb, H. (2001). Adaptive cruise control field operational test - the learning phase. *JSAE Review*, 22 (4), 487-494. DOI: 10.1016/S0389-4304(01)00142-4
- Weitzel, A. & Winner, H. (2012). Ansatz zur Kontrollierbarkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen vor dem Hintergrund der ISO 26262. In K. Dietmayer (Hrsg.), 8. *Workshop Fahrerassistenzsysteme. FAS 2012; Walting im Altmühltal*, 26. - 28. Sept. 2012 (S. 15-25). Darmstadt: Uni-Das.
- Wieland, M. (2013). *Vorbereitung zu Langzeitstudien von Fahrerassistenzsystemen im Fahrsimulator*. Semesterarbeit, Technische Universität München. München
- Winner, H. (2015). Radarsensorik. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (ATZ/MTZ-Fachbuch, 3., überarbeitete und ergänzte Auflage, S. 259-316). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Winner, H., Barthenheier, T., Fecher, N. & Luh, S. (2003). Fahrversuche mit Probanden zur Funktionsbewertung von aktuellen und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen. In K. Landau (Hrsg.), *Fahrversuche mit Probanden - Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Technische Universität Darmstadt*, 3./4. April 2003 (Fortschritt-

---

Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Bd. 557, Als Ms. gedr, S. 26–39). Düsseldorf: VDI-Verl.

Winter, J. de, van Leeuwen, P. & Happee, R. (2012). Advantages and Disadvantages of Driving Simulators: A Discussion. In A. Spink, F. Grieco, O. Krips, L. Loijens, L. Noldus & P. Zimmermann (Hrsg.), *Proceedings of Measuring Behavior 2012. 8th International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research* (S. 47–50)

Wu, Y. (2013). *Konzept und Implementierung eines antizipativen Fahrerassistenzsystems mit Head-up Display*. Semesterarbeit, Technische Universität München. München

Young, M. S., Birrell, S. A. & Stanton, N. A. (2011). Safe driving in a green world: A review of driver performance benchmarks and technologies to support ‘smart’ driving. *Applied Ergonomics*, 42 (4), 533-539. DOI: 10.1016/j.apergo.2010.08.012

Zimmermann, M., Bauer, S., Lütteken, N., Rothkirch, I. M. & Bengler, K. J. (2014). Acting together by mutual control: Evaluation of a multimodal interaction concept for cooperative driving. In W. W. Smari (Hrsg.), *International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), 2014* (S. 227–235). Piscataway, NJ: IEEE.

Zöllner, I. M. (2015). *Analyse des Einflusses ausgewählter Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation auf die Fahrerverhaltensvalidität*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt



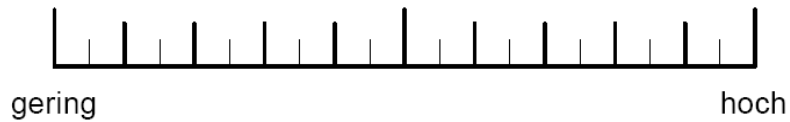


**B Angaben nach der Baseline-Fahrt**

<b>1) <u>Mentale (geistige) Beanspruchung</u></b>
In welchem Maße stellte die Fahrt eine geistige Anforderung dar (denken, entscheiden, erinnern, beobachten, suchen)?
<p style="text-align: center;">gering <span style="float: right;">hoch</span></p>
<b>2) <u>Physische (körperliche) Beanspruchung</u></b>
Wie sehr waren Sie während der Fahrt körperlich beansprucht (drücken, ziehen, bewegen, etc.)?
<p style="text-align: center;">gering <span style="float: right;">hoch</span></p>
<b>3) <u>Anstrengung</u></b>
Wie sehr mussten Sie sich bei der Fahrt insgesamt anstrengen (geistig und körperlich)?
<p style="text-align: center;">gering <span style="float: right;">hoch</span></p>

**4) Emotionale Empfindung**

Wie unsicher, entmutigt und gestresst fühlten sie sich während der Fahrt?



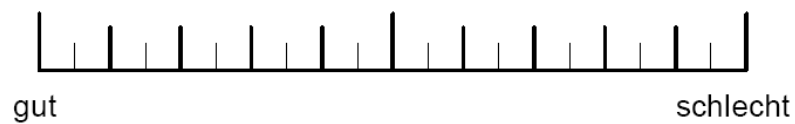
**5) Zeitdruck**

Wie sehr haben Sie sich durch die Fahraufgabe unter Zeitdruck gefühlt? War das Arbeitstempo eher langsam und gemächlich oder schnell und hektisch?



**6) Aufgabenerfüllung**

Wie erfolgreich konnten Sie die **Fahraufgabe** erfüllen? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrem Ergebnis?



**C Angaben nach der Fahrt mit System**

<b>1) <u>Mentale (geistige) Beanspruchung</u></b>
In welchem Maße stellte die Fahrt eine geistige Anforderung dar (denken, entscheiden, erinnern, beobachten, suchen)?
<p style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <span>gering</span> <span>hoch</span> </p>
<b>2) <u>Physische (körperliche) Beanspruchung</u></b>
Wie sehr waren Sie während der Fahrt körperlich beansprucht (drücken, ziehen, bewegen, etc.)?
<p style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <span>gering</span> <span>hoch</span> </p>
<b>3) <u>Anstrengung</u></b>
Wie sehr mussten Sie sich bei der Fahrt insgesamt anstrengen (geistig und körperlich)?
<p style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <span>gering</span> <span>hoch</span> </p>

**4) Emotionale Empfindung**

Wie unsicher, entmutigt und gestresst fühlten sie sich während der Fahrt?



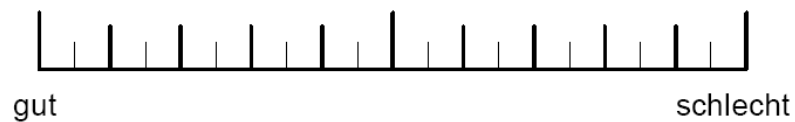
**5) Zeitdruck**

Wie sehr haben Sie sich durch die Fahraufgabe unter Zeitdruck gefühlt? War das Arbeitstempo eher langsam und gemächlich oder schnell und hektisch?



**6) Aufgabenerfüllung**

Wie erfolgreich konnten Sie die **Fahraufgabe** erfüllen? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrem Ergebnis?



7) Bitte bewerten Sie die Anzeige möglichst spontan mit Hilfe der unten angegebenen Adjektiv-Paare. Wenn Sie keine Zuordnung treffen können oder die Anzeige neutral einstufen, kreuzen Sie bitten den Mittelpunkt der Skala an.

Diese Anzeige ist...

anregend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	ermüdend
dynamisch	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	statisch
müde	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	frisch
aktiv	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	passiv
schnell	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	langsam
angenehm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unangenehm
effektiv	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	ineffektiv
erstrebenswert	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nicht erstrebenswert
gut	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	schlecht
ideenlos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	innovativ
langweilig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	interessant
nützlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nutzlos
unbequem	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	komfortabel
wichtig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unwichtig
erfreulich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	ärgerlich
gefährlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	sicher
kühl	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	gefühlvoll
kontrollierbar	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unkontrollierbar
stark	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	schwach

## D Eigenschaften des Systems

Bitte bewerten Sie die verschiedenen Eigenschaften des Systems.

	trifft ab- solut nicht zu	trifft e- her nicht zu	weder noch	trifft e- her zu	trifft ab- solut zu
Das System erhöht die Verkehrssicherheit.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das System würde das Autofahren langweilig machen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Informationen, die das System ausgibt, sind für den Nutzer ungenügend.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das System erhöht den Fahrgenuss.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das System macht auch mal Fehler.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das System fördert die körperliche die körperliche Entspannung beim Fahren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das System kann vor Verkehrsverstößen bewahren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fahren mit dem System macht Spaß.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das System trägt dazu bei, das Unfallrisiko zu senken.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Fahren mit diesem System belastet den Fahrer zusätzlich.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit dem System kann man sportlich fahren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit dem System erhöht sich der Komfort des Autofahrens.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das Erlernen der Bedienung des Systems ist schwierig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das System fördert Stress beim Fahren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das System unterstützt den Fahrer dabei, Gefahren rechtzeitig zu erkennen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mit dem System kann ich Sprit sparen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Das System lenkt davon ab, Gefahren rechtzeitig zu erkennen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## E Umgang mit dem System

1) Wie sehr fühlten Sie sich durch das System bevormundet?

sehr	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	gar nicht
------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------

2) Erschienen die Hinweise des Systems zu häufig?

viel zu häufig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	viel zu selten
----------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	----------------

3) Wie sehr wurden Sie durch das System abgelenkt?

sehr	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	gar nicht
------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------

4) War das System in allen Situationen hilfreich ?  ja  nein

Wenn nein, in welchen Situationen war die Anzeige überflüssig, störend oder nervig?

---



---



---



- 5) Erschien Ihnen das Befolgen der Hinweise des Systems in allen Situationen als sinnvoll?  ja  nein

Wenn nein, in welchen nicht?

---

---

---

- 6) Gab es Situationen, in denen Sie sich durch Befolgen der Hinweise des Systems als Verkehrshindernis gefühlt haben?  ja  nein

Wenn ja, in welchen?

---

---

---

## B. Ergebnisse zum Kraftstoffverbrauch der Komplexitätsstudien

### *Kraftstoffverbrauch Szenario 1*

Kraftstoffverbrauch		Grad der Komplexität		
		Sit. 1 (einfach)	Sit. 2	Sit. 3 (komplex)
Ohne FAS	Mittelwert	100 %	106 %	119 %
	SD	20 %	25 %	31 %
Mit FAS	Mittelwert	78 %	76 %	96 %
	SD	25 %	22 %	40 %
Signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchs?		Ja t(26) = 3,64, p < 0,05	Ja t(26) = 8,31, p < 0,05	Ja t(26) = 3,88, p < 0,05

### *Kraftstoffverbrauch Szenario 2*

Kraftstoffverbrauch		Grad der Komplexität		
		Sit. 1 (einfach)	Sit. 2	Sit. 3 (komplex)
Ohne FAS	Mittelwert	100%	100%	107%
	SD	21%	24%	22%
Mit FAS	Mittelwert	90%	89%	96%
	SD	13%	21%	26%
Signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchs?		Ja t(26) = 2,32, p < 0,05	Ja t(26) = 2,28, p < 0,05	Ja t(26) = 2,56, p < 0,05

### *Kraftstoffverbrauch Szenario 3*

Kraftstoffverbrauch		Grad der Komplexität		
		Sit. 1 (einfach)	Sit. 2	Sit. 3 (komplex)
Ohne FAS	Mittelwert	100 %	102 %	123 %
	SD	13 %	15 %	32 %
Mit FAS	Mittelwert	84 %	81 %	112 %
	SD	21 %	14 %	53 %
Signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchs?		Ja t(26) = 3,44, p < 0,05	Ja t(26) = 6,67, p < 0,05	Nein t(26) = 1,14, p = 0,27

*Kraftstoffverbrauch Szenario 4*

Kraftstoffverbrauch		Grad der Komplexität		
		Sit. 1 (einfach)	Sit. 2	Sit. 3 (komplex)
Ohne FAS	Mittelwert	100 %	100 %	88 %
	SD	22 %	26 %	25 %
Mit FAS	Mittelwert	88 %	107 %	109 %
	SD	25 %	23 %	25 %
Signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchs?		Ja t(26) = 2,28, p < 0,05	Nein t(26) = 0,65, p = 0,52	Nein t(26) = 0,91, p = 0,37

*Kraftstoffverbrauch Szenario 5*

Kraftstoffverbrauch		Grad der Komplexität		
		Sit. 1 (einfach)	Sit. 2	Sit. 3 (komplex)
Ohne FAS	Mittelwert	100 %	100 %	93 %
	SD	21 %	18 %	18 %
Mit FAS	Mittelwert	98 %	98 %	96 %
	SD	29 %	20 %	20 %
Signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchs?		Nein t(26) = 0,99, p = 0,33	Nein t(26) = 1,52, p = 0,14	Nein t(26) = 0,95, p = 0,35

*Kraftstoffverbrauch Szenario 6*

Kraftstoffverbrauch		Grad der Komplexität		
		Sit. 1 (einfach)	Sit. 2	Sit. 3 (komplex)
Ohne FAS	Mittelwert	100%	101%	108%
	SD	15%	13%	19%
Mit FAS	Mittelwert	98%	92%	96%
	SD	16%	14%	18%
Signifikante Reduktion des Kraftstoffverbrauchs?		Nein t(26) = 0,58, p = 0,57	Ja t(26) = 3,39, p < 0,05	Ja t(26) = 3,26, p < 0,05

**C. Van der Laan Fragebogen für Langzeitversuche**

**Beurteilen Sie bitte jetzt das Assistenzsystem. Dabei bedeutet 1 "trifft voll zu" und 5 "trifft gar nicht zu" \***

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	1	2	3	4	5	
Nützlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Unnützlich
Angenehm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Unangenehm
Schlecht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Gut
Nett	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Nervig
Effizient	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Unnötig
Ärgerlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Erfreulich
Hilfreich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Wertlos
Nicht wünschenswert	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Wünschenswert
Aktivierend	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Einschläfernd